

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**A UTILIZAÇÃO DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO
TEMPO (TDR) NA MODELAGEM DO BULBO MOLHADO DO
SOLO IRRIGADO POR GOTEJAMENTO**

CLAUDINEI FONSECA SOUZA

CAMPINAS
AGOSTO DE 2002

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**A UTILIZAÇÃO DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO
TEMPO (TDR) NA MODELAGEM DO BULBO MOLHADO DO
SOLO IRRIGADO POR GOTEJAMENTO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola na área de concentração em Água e Solos.

CLAUDINEI FONSECA SOUZA

Orientador: Prof. Dr. Edson Eiji Matsura

CAMPINAS
AGOSTO DE 2002

DEDICATÓRIA

Ofereço este trabalho a algumas pessoas que muito estimo:

- Roselena, minha esposa, namorada e companheira, pela presença nos momentos de alegria e tristeza.
- Paulo, Maria, Claudia e Cleide, por tudo que eles representam.

Durante o curso aprendi muitas lições, entre elas elegi um lema: *Eu nunca, nós sempre.*

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Edson Eiji Matsura pela orientação, amizade e colaboração no meu crescimento científico, contribuindo em minha formação crítica e criativa.
- Ao Prof. Dr. Roberto Testezlaf pela co-orientação, amizade e contribuição no meu desenvolvimento acadêmico.
- À Faculdade de Engenharia Agrícola pela assistência e oportunidade oferecida.
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro no início do projeto.
- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro durante a execução do projeto.
- À Banca de Qualificação (Prof. Dr. Dirceu Brasil Vieira, Prof. Dr. Carlos Roberto Espindola, Prof. Dr. Osny O. Bacchi), pelas sugestões e contribuições realizadas no início do trabalho.
- Aos Professores, Dr. Flávio B. Arruda, Dr. José Tadeu Garcia Tommaselli, Dr. Eugênio F. Coelho, Dr. Dani Or, Prof. Alberto Colombo, pelo incentivo e contribuição no desenvolvimento do trabalho.
- Aos funcionários da Feagri, em especial aos do Laboratório de Hidráulica e Irrigação, Laboratório de Solos, Campo Experimental, Máquinas e Eletrônica pela colaboração no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho.
- Aos funcionários da Seção de Pós-graduação e Biblioteca pela dedicação e suporte técnico oferecido.
- Aos amigos do Gehidre, Adalberto, Délvio, Junior, Chris, Tião, Calhau, Fernanda, Ana Carolina, Marcelus, Sérgio, Laércio, Helbert, Eder, Leandro, Patrick, pela convivência e amizade durante todos estes anos.
- A todas as pessoas que de alguma forma participaram da elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS	v
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO GERAL	1
HIPÓTESE DO TRABALHO	4
OBJETIVO.....	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS	14
Publicação I.....	14
Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo	14
Publicação II.....	31
A variable-volume multi-wire TDR probe for measuring water content distribution	31
Publicação III	50
Application of the TDR technique in tropical soil.....	50
Publicação IV	59
Multi-wire Time Domain Reflectometry (TDR) probe with electrical impedance discontinuities for measuring water content distribution	59
Publicação V	76
Infiltração e distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento	76
Publicação VI.....	97
Avaliação de modelos de infiltração da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento.....	97
DISCUSSÃO GERAL	104
CONCLUSÃO GERAL	107
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	109

LISTA DE SÍMBOLOS

a e d	= Diâmetro do condutor interno (m)
b	= Diâmetro do condutor externo (m)
c	= Velocidade da luz ($0,30 \text{ m.ns}^{-1}$)
CC	= Capacidade de campo ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)
d	= Diâmetro horizontal no bulbo molhado (m)
EC	= Condutividade elétrica (dS.m^{-1})
ETd	= Evapotranspiração potencial de para o dimensionamento (mm)
H	= Pressão (m)
K e ϵ	= Constante dielétrica (adimensional)
Ka e ϵ_b	= Constante dielétrica aparente (adimensional)
Ks	= Condutividade hidráulica saturada (m.h^{-1})
L	= Comprimento de haste da sonda de TDR (m)
n_{vg} e m_{vg}	= Parâmetro de solo (adimensional)
p e p_{ref}	= Coeficiente de reflexão (adimensional)
PMP	= Ponto de murcha permanente ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)
q	= Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
Q	= Vazão (L.h^{-1})
s	= Raio do condutor externo (m)
TFSA	= Terra fina seca ao ar
V	= Volume de água (m^3)
V_0 e v_0	= Amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR (Ω)
V_1 e v_1	= Amplitude do sinal eletromagnético depois da reflexão do início da sonda (Ω)
x e y	= Coordenadas cartesianas (m)
z	= Profundidade vertical no bulbo molhado (m)
Z_0 e z_0	= Impedância característica (Ω)
Z_u e z_u	= Impedância no cabo coaxial (Ω)
α_{vg}	= Parâmetro de ajuste da curva de retenção da água – parâmetro de solo (m^{-1})
Δt	= Tempo de deslocamento do sinal eletromagnético (ns)

ϵ_a	= Constante dielétrica do ar (adimensional)
ϵ_s	= Constante dielétrica das partículas do solo (adimensional)
ϵ_w	= Constante dielétrica da água (adimensional)
θ	= Umidade volumétrica ($m^3 \cdot m^{-3}$)
θ_i	= Umidade volumétrica ($m^3 \cdot m^{-3}$)
θ_r	= Umidade volumétrica residual ($m^3 \cdot m^{-3}$)
θ_s	= Umidade volumétrica de saturação ($m^3 \cdot m^{-3}$)

RESUMO

Em virtude da potencialidade do sistema de irrigação por gotejamento, aliado à necessidade de pesquisas com culturas irrigadas por esse sistema, tem sido crescente a demanda de informações nessa área. Isto se deve, sobretudo, ao dimensionamento desses sistemas de irrigação. Atualmente, alguns critérios extrapolados para as nossas condições, na forma de tabelas e fórmulas retiradas da literatura, são aplicados no dimensionamento e no manejo.

Visando este problema estudou-se a infiltração e distribuição da água no solo em função do tempo utilizando-se a técnica da TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo). O trabalho foi dividido em duas partes. Na primeira, a viabilidade do uso de sondas de TDR multi-haste segmentadas na determinação da distribuição espacial e temporal da água no solo; e na segunda, os efeitos no processo de infiltração e distribuição da água no solo que poderiam afetar a formação do bulbo molhado. Ambas as partes foram realizadas em condições de laboratório e campo.

Foi possível verificar a viabilidade do uso de sondas de TDR multi-haste segmentadas na estimativa da umidade distribuída em um perfil de solo e com esta obteve-se resultados que permitiram concluir que: efetivamente existe uma relação direta entre a condutividade hidráulica com o desenvolvimento do bulbo molhado. Além disso, os resultados demonstraram que a umidade inicial do solo, o volume aplicado, a vazão do gotejador, o disco saturado são elementos importantes e devem ser conhecidos para o dimensionamento e o manejo adequado da irrigação.

ABSTRACT

The potentiality of the using drip irrigation system in new areas is increasing as well as the necessity of more research in irrigated due to new materials and new irrigation system. Nowadays, some approaches that are extrapolated for using tropical conditions and applied in the design and water management are presented in the tables and formulas obtained international literature.

Following this necessity to adapt technology a study of soil water infiltration and distribution as a function of time was carried out using TDR technique (Time Domain Reflectometry). The experiment was divided in to two parts. In the first one, it was mitigated the viability to use TDR probes with electrical impedance discontinuities to determine the spatial and temporal soil water distribution. In the second one, the effects in the soil water infiltration and distribution process, which can affect the wetted volume development. Both parts were accomplished in laboratory and field conditions.

The results demonstrated the viability of using the TDR probes with electrical impedance discontinuities to estimate the distribution water content in a soil profile. There are a direct relationship between the hydraulic conductivity and the development of wetted volume. Besides, the initial soil water content, the applied water volume, the discharge rate and the surface saturated disk are essential elements for an appropriate irrigation design and management.

INTRODUÇÃO GERAL

O setor agrícola constitui uma opção importante para o desenvolvimento brasileiro, visto que poderá contribuir para o abastecimento de alimentos, combustíveis, e fibras, além de gerar excedentes exportáveis. Esta opção, entretanto, não está sendo ainda devidamente considerada, uma vez que, nos últimos anos, o país tem sido obrigado a importar grandes quantidades de diversos produtos agrícolas para atender a uma demanda crescente.

A instabilidade climática se mostra como um dos fatores determinantes para que a produtividade esteja sempre aquém da desejada. Um dos fatores climáticos de maior variabilidade é a precipitação pluviométrica. Sabe-se que, na maioria dos casos, a disponibilidade de chuva é um dos critérios que determina a máxima produção possível para um dado local e espécie cultivada. Portanto, se faz necessária, a otimização da produção através do uso de novas técnicas e recursos.

Uma técnica bastante utilizada para suprir a demanda de água pelas culturas é a prática da irrigação, que possibilita a incorporação de áreas previamente consideradas impróprias para o cultivo, pela ocorrência de déficits hídricos. Além de proporcionar o aumento da produtividade, pode contribuir para melhoria da qualidade e se constituir também em fator estabilizador da produção. Christofidis (1999) apresenta que o método de irrigação por superfície continua a ser o mais utilizado no Brasil, com cerca de 1,7 milhões ha (59 %), predominante nas regiões Norte e Sul, enquanto a irrigação por aspersão prevalece nas demais regiões (35 %). A localizada representa a menor área, com 182 mil ha em fase de crescimento, especialmente nas regiões Nordeste e Sudeste.

A agricultura irrigada moderna busca mais do que simplesmente o aumento de produção de alimento. É necessário que seja sustentada no meio ambiente primando pelo bom manejo da água. Desta forma, surge o principal desafio: implantar esta tecnologia com base em dados econômicos e sem prejuízos ao meio ambiente.

Dentre os vários sistemas, a irrigação por gotejamento tem sido crescentemente utilizada, principalmente pela sua maior eficiência no uso da água. A água é aplicada ao solo em pequenas quantidades, porém com alta frequência, diretamente sobre a região radicular, mantendo a umidade do solo, nessa região, próximo à capacidade de campo. Essa região é conhecida como bulbo molhado, de onde as raízes da planta irrigada absorvem facilmente água e nutrientes.

A estimativa adequada da forma e dimensões do bulbo molhado é de fundamental importância para a determinação do número de emissores por planta e da sua localização em relação à planta ou fileira de plantas. A subestimativa da porcentagem de solo molhado reduz a eficiência do sistema onerando-o desde o superdimensionamento da estrutura hidráulica ao desperdício de água, energia e fertilizantes; enquanto que a superestimativa poderá acarretar riscos de estresse à cultura e promover a má distribuição do sistema radicular.

As dimensões do bulbo molhado dependem, sobretudo, dos seguintes fatores: estrutura e textura do solo, vazão do gotejador, frequência de aplicação e umidade inicial do solo. A compreensão inadequada destes fatores associa-se, no Brasil, ao uso incorreto da técnica da irrigação localizada, na maioria das vezes devido à utilização de informações empíricas, retiradas diretamente da literatura estrangeira.

Testes em campo são sugeridos para gerar informações capazes de auxiliar, ou de gerar modelos matemáticos, na estimativa do dimensionamento do sistema de irrigação por gotejamento. Geralmente, testes de campo não são realizados devido ao tempo necessário, trabalho árduo, recursos e cuidados experimentais envolvidos, principalmente por ser recomendado a abertura de trincheiras.

Assim, a prática se adianta à investigação científica e com isso surgem os problemas. Infelizmente, este fato tem implicado em prejuízos de produtividade e desestímulo ao uso da técnica de gotejamento por parte de alguns agricultores.

Alternativamente, a medição do bulbo molhado pode ser realizada com a utilização de sensores de umidade, por exemplo, termalização de nêutrons, resistência elétrica e reflectometria no domínio do tempo (TDR) conforme cita Coelho et al., (1995).

A sonda de nêutrons exige um treinamento e licença especial para seu manuseio, principalmente pela presença de fontes radioativas. O bloco de gesso é um instrumento simples e de baixo custo, mas o elemento sensor sofre deterioração com o tempo devido à interação com os compostos químicos do solo (Selker et al., 1993; Coelho & OR, 1996).

Para medidas de umidade do solo em laboratório e em campo a utilização da TDR possui algumas vantagens quanto ao uso, principalmente pela precisão, possibilidade de multiplicação de leituras, repetição sem destruição da amostra de solo, ampla faixa de detecção de umidade e pela segurança (Topp et al. 1980; Coelho & Or, 1996). A TDR baseia-

se no efeito da umidade do solo sobre a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em cabo condutor envoltos pelo solo.

Souza & Matsura (2002), verificaram a possibilidade de utilização de uma sonda do tipo multi-haste segmentada (hastes descontínuas) em um equipamento de TDR convencional, modelo Trase System I, visando a possibilidade de medidas de umidade do solo em diversas profundidades, usando uma única sonda. Esta vantagem adicional pode tornar a TDR ainda mais atrativa, principalmente para estudar a distribuição da água dentro do bulbo molhado.

Neste trabalho, propôs-se estudar a utilização de sondas de TDR multi-haste segmentadas na determinação da infiltração e distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento.

HIPÓTESE DO TRABALHO

A técnica da TDR é utilizada em diversos setores como: telecomunicações, construção civil, geociência, agrícola e etc. Usar a técnica no monitoramento da água no solo aplicada por gotejadores é a hipótese deste trabalho. Desta forma, alguns objetivos foram propostos conforme é discriminado a seguir.

OBJETIVO

Estudar a infiltração e distribuição da água no solo em função do tempo usando uma fonte pontual, de forma a poder caracterizar o bulbo molhado utilizando a técnica da TDR. Para atingir esse objetivo as seguintes etapas foram propostas:

Verificar o uso da sonda de TDR multi-haste segmentada na determinação da distribuição espacial e temporal da água no solo.

Estudar em condições de laboratório e de campo a formação do bulbo molhado, avaliando-se os efeitos da relação água-solo que poderiam afetar o processo de infiltração e distribuição da água no solo.

Aplicar um modelo matemático de simulação da distribuição espacial da água no solo adequado às características do experimento, que seja capaz de fornecer elementos básicos para o dimensionamento da irrigação por gotejamento.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Dasberg & Bresler (1985), Azevedo (1986) e Dasberg & Or (1999), a irrigação por gotejamento consiste na aplicação de pequenas quantidades de água diretamente na zona radicular das plantas através de fonte pontual ou linha (gotejadores) sobre ou abaixo da superfície do solo, com pressões de operação variando entre 20-200 kPa e baixa vazão (1-30 L.h⁻¹). Esta aplicação resulta em um volume de solo molhado, conhecido como bulbo molhado.

A irrigação por gotejamento ocupa uma significativa porção das áreas irrigadas no mundo e está em crescimento. Mas, somente em áreas específicas e para culturas economicamente rentáveis. A razão para esta limitação é econômica, pois o método possui alto custo de equipamentos, instalação e manutenção. Esta limitação pode ser agravada em regiões que possuem baixo preço na captação da água. Somente quando a água é severamente limitada, alto preço e com distribuição controlada existe reais vantagem econômicas na utilização da irrigação localizada (Dasberg & Or, 1999).

Entre as vantagens destaca-se a eficiência da irrigação e a conseqüente economia de água e energia. A água é aplicada sob a copa das plantas, o que reduz as perdas por evaporação (problema agravado em outros sistemas como de superfície e aspersão) e propicia eficiência de 90 % ou mais, representando uso mais racional da água. Wu & Gitlin (1975) concluem que uma eficiência de aplicação de 90 % pode ser facilmente alcançada em irrigação por gotejamento quando comparada com a aspersão (60-80 %) e a superficial (50-60 %). Este cálculo assume que a variação de vazão entre os gotejadores não excede 20 %, o qual é um critério conservador de acordo com Solomon & Keller (1978). Alguns gotejadores modernos possibilitam coeficiente de variação menor que 5 %, resultando em um coeficiente de uniformidade maior que 96 %.

O sistema de irrigação por gotejamento é composto de linhas laterais, linhas secundárias, linha principal e cabeçal de controle. As linhas laterais são de polietileno, flexível e opaco para evitar o desenvolvimento de algas. Nessa linha estão inseridos os gotejadores, que aplicam a água à cultura. As linhas secundárias levam a água da linha principal às linhas laterais, normalmente são enterradas, podendo ser de PVC ou de metal. O cabeçal de controle é composto de moto bomba, filtro de areia, filtro de tela, misturador de adubos, válvula e registro. A função deste conjunto é fornecer água limpa a pressão suficiente para os

gotejadores. O êxito da irrigação por gotejamento depende do processo de filtração, bom funcionamento dos gotejadores e dos dimensionamentos previstos no projeto de irrigação (Vieira, 1975 e Keller & Bliesner, 1990).

O sistema de irrigação por gotejamento constitui-se numa das melhores alternativas para superar a ocorrência de significativa variabilidade espacial de características físicas, químicas e morfológicas dos solos na área irrigada. Através de simples modificações operacionais, ou mesmo dimensionais, este sistema pode atender a eventuais variações de características de retenção e movimentação de água na área irrigada o que certamente, seria mais difícil de conseguir nos sistemas por superfície, ou em alguns equipamentos mecanizados por aspersão, como o pivô central, o deslocamento linear, e o autopropelido (Scaloppi, 1986).

Segundo Vieira (1975), a água é aplicada através de uma fonte puntiforme ao solo em pequenas quantidades, porém com alta frequência, mantendo a umidade do solo, nessa região, próximo à capacidade de campo sem resultar problemas de aeração. Esta água aplicada forma uma superfície, que pouco a pouco vai crescendo radialmente para os lados e para baixo. Desta forma, no interior do solo se forma um bulbo molhado, no qual as raízes e radículas da planta irrigada absorvem água e nutrientes. Geralmente, nos solos argilosos, o movimento horizontal é maior do que nos solos arenosos.

Segundo citações de Bresler et al. (1971) e Olitta (1977) entre outros, a distribuição do conteúdo de água para duas vazões de um gotejador quando confrontada com variáveis de umidade no espaço e no tempo durante o processo de infiltração, revelaram que a vazão do gotejador tem efeito marcante na forma do bulbo molhado.

A distância entre os gotejadores dependerá da forma e dimensão do bulbo, que deve tornar-se contínuo e homogêneo ao longo da linha da cultura, pois múltiplos ensaios agrícolas demonstram que as raízes absorventes das plantas têm a característica de se concentrarem rapidamente nas zonas regularmente úmidas, sendo que um terço dessas raízes ativas assegura 80 % da necessária absorção de água, conforme afirma Vieira (1975). Black & West (1974) observaram que 25 % do sistema radicular de uma macieira pode absorver 75 % da água necessária para suas funções fisiológicas. Willoughby & Cockroft (1974) reportam resultados semelhantes para pessegueiros.

Willoughby & Cockroft (1974) observaram também, uma proliferação de novas raízes nas vizinhanças do gotejador, um fato relatado por outros pesquisadores. Um exemplo

citado por Frith & Nichols (1974) descreve que este efeito foi intensificado com a aplicação de fertilizante através da irrigação.

Um dos principais problemas da irrigação por gotejamento de pomares e hortas consiste em decidir se é suficiente uma linha lateral por fila de plantas ou se serão necessárias duas (ou, mesmo, três). O número de condutos por fila irá determinar o preço do sistema por unidade de área e, em muitos casos, a rentabilidade do processo em si. É, por isso, importante conhecer e compreender a forma de distribuição da água por gotejadores de diferentes fluxos, em diversos tipos de solo. É importante este conhecimento básico; não, porém, suficiente. Os ensaios de campo, em várias condições de solo, é que permitem completar tal informação (Vieira, 1975).

O sistema de irrigação por gotejamento apresenta grande flexibilidade operacional, o que pode resultar em um melhor aproveitamento da irrigação. Porém, o conhecimento do processo de infiltração e distribuição da água no solo torna-se peça fundamental para a elaboração de projetos e manejo da irrigação por gotejamento.

Durante o processo de infiltração, se o solo estiver relativamente seco, existe uma diferença visível entre o solo molhado pela lâmina de água que avança e o solo seco. Este plano é denominado frente de molhamento. No caso da infiltração de água em solos relativamente úmidos, à frente de molhamento é difusa e difícil de ser determinada (Reichardt, 1990).

A propagação da frente de molhamento, proveniente de uma fonte pontual de água no solo, é tridimensional e a forma do volume de solo umedecido (bulbo molhado) depende, principalmente, do equilíbrio entre as forças capilares e gravitacionais. Entretanto, o solo por ser um meio heterogêneo, a infiltração também é afetada pela textura do solo, condutividade hidráulica, volume e vazão do gotejador e umidade inicial do solo (Keller, 1984).

Durante o processo de infiltração, identifica-se uma área saturada na superfície do solo (disco saturado), originado pelo funcionamento do gotejador. Assim, a água distribui-se pelos poros vizinhos, cuja umidade é menor, em direção ao menor potencial total, o qual basicamente é formado pelos potenciais gravitacional e matricial (Pizarro, 1987). Segundo Halevy et al. (1973) o processo de infiltração da água no solo pode ser dividido em três fases: Fase I - Zona de transmissão: a umidade do solo está próxima da saturação; Fase II - Zona de

molhamento: ocorre o fluxo da água na direção do menor potencial total; e Fase III - Frente de molhamento: é o limite extremo da zona de molhamento.

A variação espacial das propriedades físicas do solo adiciona variações na infiltração e distribuição da água pelos gotejadores. Estas variações no volume de solo molhado são um problema à estimativa adequada do número de gotejadores por planta e de sua localização em relação às plantas ou fileiras de plantas (Clothier et al., 1985; Or, 1996).

Informações empíricas sobre a infiltração e distribuição da água no solo para a irrigação, geralmente, são aplicadas. Estas informações, retiradas da literatura na forma de tabelas e fórmulas, são baseadas em estudos conduzidos para uma determinada proposta, que não contribuem significativamente com informações que possam ser usadas em todas as condições de dimensionamento e manejo da irrigação. Há um grande volume de trabalhos sobre infiltração da água no solo, com o objetivo de estudar a formação do bulbo molhado. Poucos correlacionam as propriedades físicas do solo com os sistemas de irrigação. São necessários, portanto, contribuições significativas e precisas de forma que as informações possam ser usadas para auxiliar nas melhores decisões possíveis, dentro das condições de incerteza. Entre os trabalhos destacam-se estudos sobre a proporção da superfície ou volume de solo molhado e a formação do bulbo molhado.

A percentagem de área molhada depende de fatores relacionados ao espaçamento, vazão dos gotejadores e propriedades físicas do solo. Porém, a área mínima ideal para o dimensionamento do sistema não está ainda definida, sendo razoável segundo Pizarro (1987) o valor de 30 a 40 % em relação à área total. Com valores menores, corre-se o risco de os mesmos serem insuficientes em relação ao consumo de água pela planta. Acima desta faixa de valores a situação é mais segura, porém o custo da irrigação é mais elevado onerando o projeto e reduzindo o retorno financeiro.

Já Karmeli & Keller (1975) aconselham, para cultivos amplamente espaçados, percentagens superiores a 20 %, em zonas com altas precipitações e solos de textura média a argilosa, onde a irrigação é aplicada durante os períodos de seca (geralmente curtos), entre 33 e 50 % em zonas com baixas precipitações. Os autores recomendaram umedecer um mínimo de 33 % do volume radicular potencial de culturas menos espaçadas, em que a maioria do volume de solo pode precisar ser umedecida para assegurar um suficiente suprimento de água a cada planta.

Em uma segunda citação em 1990, Keller em cooperação com Bliesner consideraram uma percentagem inferior a 67 % para regiões áridas e superior a 33 % para regiões de irrigação suplementar e, sugerem uma área molhada sobreposta de 20 % para alcançar índices ideais de uniformidade de distribuição da água no solo.

Tem-se tentado, também, determinar a forma do bulbo molhado em função das propriedades físicas dos solos. Os métodos são complexos e o resultado pouco confiável, dada a heterogeneidade dos solos, mas já se chegou a algumas regras práticas. A mais importante é que o volume de solo úmido é diretamente proporcional ao volume de água aplicado e inversamente proporcional ao conteúdo de água inicial do solo. A extensão horizontal do bulbo, H, está diretamente relacionada com a força capilar e com a raiz quadrada do tempo de aplicação, exceto se houver algum obstáculo ao movimento de água. A extensão vertical, V, está diretamente relacionada com a extensão horizontal do bulbo e o produto de H por V é proporcional ao volume de água aplicado. Apesar destas regras gerais é difícil prever qual pode ser o padrão de distribuição da água em um dado solo (Salles, 1990).

Para um mesmo volume aplicado, o aumento da vazão implica um aumento do movimento horizontal e um decréscimo da profundidade do bulbo molhado. À medida que se aumenta o volume de água aplicado, maior é o avanço da frente de molhamento, tanto em profundidade quanto lateralmente, aumentando as dimensões do bulbo molhado (Bresler et al., 1971).

Bresler (1978) desenvolveu uma aproximação para determinar o espaçamento entre gotejadores usando solução analítica para fluxo constante e Wooding (1968) combinou informações hidráulicas de descarga de gotejadores e propriedades físicas do solo, o que possibilitou estimar o potencial mátrico desejável em função do rendimento da cultura.

Taghavi et al. (1984), propuseram um modelo para simular a infiltração bidimensional proveniente de uma fonte pontual. A inovação deste modelo foi a de simular o movimento da água, por meio de ambientes de solo seco, causando uma frente de molhamento abrupta, assim como sua aplicabilidade potencial em regiões de fluxo com contornos irregulares. Estas condições são comumente encontradas no campo e são difíceis de se modelar pelo método de diferença finita ou outros métodos numéricos.

Embora essas metodologias sejam fabulosas e estruturadas, várias desvantagens surgem, limitando a aplicabilidade para estudos teóricos. O uso rotineiro de modelos

numéricos (Simunek et al. 1993), ou analíticos (Warrick, 1974) para o propósito de dimensionamento, ainda é considerado pouco prático devido à falta de informações das propriedades físicas do solo. Desta forma, os projetistas recorrem a modelos semi-empíricos, os quais baseia-se na geometria do bulbo molhado produzido pelo emissor. Como por exemplo, as teorias apresentadas por Schwartzman & Zur (1986) e Zur (1996), os quais descrevem um modelo semi-empírico para a distribuição da água no solo baseado em uma simplificação para a estimativa da geometria e volume do bulbo molhado. Mas mesmo as mais simples teorias necessitam serem alimentadas com dados coletados em campo, a partir de ensaios de caracterização do bulbo molhado.

Embora os esforços sejam grandes, a proporcionalidade da produção de uma cultura em relação à percentagem de área molhada e a formação do bulbo molhado ainda carecem de uma resposta concreta, principalmente por causa da dificuldade de se abordar este tema em experimentos e, também porque essa resposta varia não só em função da cultura como também conforme as condições climáticas, especialmente, a evapotranspiração, a quantidade de chuva e outros.

A escolha adequada da vazão do gotejador e do volume de água aplicado tem grande utilidade em termos de projeto, dada a possibilidade de controlar o conteúdo de água e a forma do volume de solo molhado, porém tem-se que conhecê-los a priori, por meio de ensaios de campo (Keller, 1984). Portanto, informações direcionadas que respeitem, principalmente, as propriedades físicas do solo, podem ser extremamente úteis no dimensionamento da irrigação, possibilitando a determinação de critérios de projeto como área molhada pelo gotejador, dimensões do bulbo molhado, eficiência dos sistemas e posicionamento de sensores de umidade e de potencial.

Vários trabalhos consideram o método da trincheira como o mais usado para a determinação das dimensões do bulbo molhado, mas com certeza é o mais trabalhoso. Corroborando com essa tendência, Keller & Bliesner (1990) recomendam que o método da trincheira deve ser realizado em um período seco do ano. Entretanto, com o advento da tecnologia na agricultura, a medição por sensores de umidade ganhou a preferência de vários pesquisadores, por exemplo: Ward et al. (1995), Revol et al. (1997), Coelho & Or (1997), Nadler et al. (1999), Bejat et al. (2000), Mmolawa & Or, (2000), Ould Mohamed El-Hafedh et al. (2001).

Diversos são os métodos para a determinação da umidade do solo, como o gravimétrico, considerado o método direto padrão, além dos métodos indiretos, tais como termalização de nêutrons, resistência elétrica e reflectometria no domínio do tempo (TDR).

O método gravimétrico apresenta resultados precisos a um custo relativamente baixo, quando usado como técnica laboratorial, mas para medidas no campo o acondicionamento e transporte das amostras podem reduzir a precisão dos resultados e, ainda, para amostragens repetidas em uma pequena área, podem causar interferência no local em estudo. O uso da sonda de nêutrons exige um treinamento e licença especial para seu manuseio, principalmente pela presença de fontes radioativas. O bloco de gesso é um instrumento simples e de baixo custo, mas o elemento sensor sofre deterioração com o tempo devido à interação com os compostos químicos do solo (Selker et al., 1993; Coelho & Or, 1996). Portanto, ainda não existe uma técnica ideal capaz de atender da melhor forma possível todas as condições e interesses envolvidos.

No entanto, para medidas de umidade do solo em laboratório e em campo, a utilização da TDR possui algumas vantagens quanto ao uso, principalmente pela precisão, possibilidade de multiplicação de leituras, repetição sem destruição da amostra de solo, ampla faixa de determinação da umidade e pela segurança (Topp et al., 1980; Coelho & Or, 1996).

A técnica da TDR, como método de medida de umidade e condutividade elétrica do solo, vem se destacando no cenário das técnicas empregadas para medidas de parâmetros físicos do solo. No final da década de 60, Fellner-Feldegg, (1969) introduziram a técnica TDR como uma técnica para medir a permissividade dielétrica complexa de líquidos. A partir de então, a técnica da TDR tem sido aplicada nas medidas de propriedades dielétricas de muitos materiais, inclusive do solo.

Muitas pesquisas foram efetuadas para se avaliar o comportamento da constante dielétrica em função das características do solo. Davis & Annan (1977) entre outros, estudando os efeitos dos componentes do solo sobre as frequências das ondas eletromagnéticas, demonstraram que a parte real da constante dielétrica do solo (k') mostrava forte dependência do conteúdo de água do solo e fraca dependência da composição e da densidade do solo. Topp et al. (1980) confirmaram as hipóteses sugeridas estudando onze tipos de solos e mostraram que o parâmetro de maior peso nas variações da constante

dielétrica aparente dos solos era o conteúdo de água do solo, com um peso relativo de cerca de 93 %.

Explorando as potencialidades e as diferentes configurações das sondas e dos cabos, Topp et al. (1982) e Topp & Davis (1985) mostraram as vantagens do uso da técnica de TDR nas aplicações de campo e a sua utilidade para as avaliações do movimento de água no solo. Estes estudos possibilitam melhores análises teóricas do comportamento dielétrico dos solos (Yanuka et al. citado por Tommaselli, 1997), avaliações sobre as configurações das sondas de TDR (Zegelin et al., 1989) e de sistemas automatizados (Herkelrath et al., 1991) e multiplexados (Baker & Allmaras, 1990).

No Brasil, os primeiros trabalhos com TDR foram realizados por Herrmann (1993), que desenvolveu um equipamento de transmissão de microondas para a determinação da umidade do solo e Tommaselli (1997) que realizou estudos de calibração da técnica de TDR para 5 tipos de solos. Outros trabalhos podem ser encontrados mostrando uma tendência de aumento do uso desta técnica.

A TDR baseia-se no efeito da umidade do solo sobre a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em cabos condutores envoltos por solo. Este fenômeno se deve à diferença entre as constantes dielétricas, (K , adimensional), da água, do ar e do material sólido do solo. Na matriz do solo as constantes dielétricas variam entre 1 e 81. O ar possui o valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variam entre 3 e 5, e a água possui o valor máximo 81 (Noborio, 2001). A constante K medida neste sistema ar-solo-água é denominada constante dielétrica aparente (K_a , adimensional); assim, conhecendo-se esta variável, pode-se estimar a umidade volumétrica do solo por meio de calibrações obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório (Conciani et al., 1996). Para a medição são necessários, basicamente, um testador de cabo e um sensor com hastes metálicas (sonda) ligados por um cabo coaxial.

A técnica da TDR, aliada ao desafio de se buscar o entendimento da infiltração e distribuição sob diferentes manejos da água, pode resultar em benefícios para a o dimensionamento da irrigação por gotejamento como, por exemplo, determinar o número de emissores necessários e sua adequada localização. Desta forma, pode-se resolver um dos principais problemas deste sistema, pois esse fator irá determinar o preço do sistema por unidade de área e, em muitos casos, a rentabilidade de processo em si, tornando a irrigação por

gotejamento ainda mais atrativa como ferramenta capaz de ampliar dividendos sem causar prejuízos ao meio ambiente.

PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS

Publicação I

Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo

(Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 6, nº 1, p.63-68, 2002)

AVALIAÇÃO DE SONDAS DE TDR MULTI-HASTE SEGMENTADAS PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO¹

Claudinei Fonseca Souza² & Edson Eiji Matsura³

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Trabalho financiado pela Fapesp - 98/04931-7 e 13819-6

² Doutorando em Tecnologia de Irrigação, Feagri/UNICAMP, Departamento de Água e Solo, CP 6011, 13081-970, Campinas, SP. E-mail: cfsouza@agr.unicamp.br

³ Professor do Departamento de Água e Solo, Feagri/UNICAMP

RESUMO

O conhecimento da umidade do solo é de fundamental importância para a agricultura, sobretudo na determinação de sua variação, na otimização do manejo do solo e da água. Para medidas de umidade do solo existe tendência de utilização da técnica de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) que, de certa forma, é nova no Brasil. Colaborando com a difusão da técnica, estudou-se a possibilidade de utilização de sondas multi-haste segmentada em um equipamento de TDR. O trabalho foi dividido em duas partes, em que na primeira, as performances de duas configurações de sonda foram analisadas e, na segunda parte, as sondas foram avaliadas durante o monitoramento da umidade em condições de laboratório e de campo. Foi possível verificar-se a viabilidade do uso de sondas multi-haste segmentadas na estimativa da umidade de um perfil de solo; entretanto, a utilização da Sonda 1, com segmentação de 0,10 m, ficou limitada à profundidade de 0,40 m, devido à dificuldade da interpretação dos picos de impedância em sua extremidade.

Palavras-chave: reflectometria no domínio do tempo, guia de onda, manejo da água

MULTI-WIRE TDR PROBE EVALUATION TO MONITOR SOIL WATER CONTENT

ABSTRACT

The knowledge of soil water content is important for agriculture, mainly the determination of its changes in the soil profile in order to optimize irrigation management. The tendency to use the technique of TDR (Time Domain Reflectometry) to measure the soil water content is relatively new in Brazil. To help the diffusion of this technique, the objective of this work is to study the possibility of using multi-wire probes with electrical impedance discontinuities in

TDR equipment. The experiment was divided in to two parts. In the first one, the laboratory performance of two multi-wire probe configurations was studied; and in the second one, the evaluation of the probe reliability to monitor water content changes in porous media. The viability of the use of multi-wire probes to estimate the water content in the porous media profile was confirmed. However, the use of a probe with 0.10 m segmentation was limited to the soil depth of 0.40 m, due to the difficulty to interpret the impedance peaks at the extremity.

Key words: time domain reflectometry, waveguide, water management

INTRODUÇÃO

A água é extremamente importante na produção vegetal, o seu manejo racional é decisivo para o desenvolvimento das plantas, evitando a falta ou excesso. Desta maneira, o conhecimento da distribuição do teor de água (umidade) no solo torna-se cada vez mais necessário, uma vez que está intimamente ligado às propriedades do sistema solo-água-planta, onde o domínio desse conhecimento é, certamente, um dos fatores indispensáveis para uma agricultura sustentável e sem prejuízos ao meio ambiente.

Diversos são os métodos para a determinação da umidade do solo, como o gravimétrico, considerado o método direto padrão, além dos métodos indiretos, tais como termalização de nêutrons, resistência elétrica e reflectometria no domínio do tempo (TDR).

O método gravimétrico apresenta resultados precisos a um custo relativamente baixo, quando usado como técnica laboratorial, mas para medidas no campo o acondicionamento e transporte das amostras podem reduzir a precisão dos resultados e, ainda, para amostragens repetidas em uma pequena área, podem causar interferência no local em estudo. O uso da sonda de nêutrons exige um treinamento especial para seu manuseio, principalmente pela presença de fontes radioativas. O bloco de gesso é um instrumento simples e de baixo custo, mas o elemento sensor sofre deterioração com o tempo devido à interação com os compostos físico-químicos do solo (Selker et al., 1993; Coelho & Or, 1996).

Para medidas de umidade do solo em laboratório e em campo, a utilização da TDR possui algumas vantagens quanto ao uso, principalmente pela precisão, possibilidade de multiplicação de leituras, repetição sem destruição da amostra de solo e pela segurança (Topp et al., 1980; Coelho & Or, 1996). A TDR baseia-se no efeito da umidade do solo sobre a velocidade de propagação de pulsos de microondas em cabos condutores envoltos por solo.

Este fenômeno se deve à diferença entre as constantes dielétricas, (K [adimensional]), da água, do ar e do material sólido do solo. Na matriz do solo as constantes dielétricas variam entre 1 e 81. O ar possui o valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variam entre 3 e 5, e a água possui o valor máximo 81 (Noborio, 2001). A constante K medida neste sistema (ar-solo-água) é denominada constante dielétrica aparente (K_a [adimensional]); assim, conhecendo-se esta variável, pode-se estimar a umidade volumétrica do solo por meio de calibrações obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório (Conciani et al., 1996). Para a medição são necessários, basicamente, um testador de cabo e um sensor com hastes metálicas (sonda) ligados por um cabo coaxial.

O uso da TDR para estimar a umidade do solo tem sido limitado pelo custo, tanto do testador de cabo como da sonda, na qual existe ainda a limitação de uso em apenas uma profundidade, pois em geral as sondas são constituídas de hastes contínuas de aço inoxidável. Este fato tem sido contornado com a disponibilização de hastes segmentadas que, por diferença no diâmetro e material, permitem variação na impedância ao longo das mesmas e leituras em diferentes profundidades no perfil do solo (Topp & Davis, 1985, Conciani et al., 1996 e Souza et al., 1999). Sabe-se, porém, que sua utilização não está difundida entre os usuários da técnica, devido à carência de informações descrevendo suas potencialidades e limitações, principalmente sobre a qualidade e a precisão de leituras *versus* configuração de sondas.

O desafio de se conhecer e utilizar essas informações, de forma correta, pode resultar em configurações de sondas com vantagens adicionais como, por exemplo, a possibilidade de leituras pontuais de umidade, tornando a técnica da TDR ainda mais atrativa como ferramenta capaz de auxiliar em estudos que envolvam a dinâmica da água no solo.

Este trabalho teve por objetivo desenvolver e avaliar sondas multi-haste segmentada para se estimar a umidade do solo em condições de laboratório e de campo, utilizando-se um TDR-Trase System I⁴.

⁴ Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores

MATERIAL E MÉTODOS

Performance das sondas multi-haste segmentada

A sonda multi-haste segmentada foi projetada para estimar a umidade do solo e suas dimensões são baseadas em uma linha de transmissão coaxial.

O uso desta sonda para estimar a umidade do solo não é novo (Topp & Davis, 1985; Conciani et al., 1996; Souza et al., 1999) e algumas adaptações e mudanças se fizeram necessárias para melhorar o desempenho da mesma como, por exemplo, no sistema de fixação das hastes existentes no cabeçote da sonda, que aumentam a reflexão do sinal eletromagnético; adição de um segmento pontiagudo para facilitar a penetração da sonda no solo, e redução do comprimento dos segmentos visando obter estimativas pontuais de umidade.

As sondas multi-haste segmentadas desenvolvidas, consistem de um sensor com hastes metálicas com trechos de distintos valores de impedância. Esses trechos são facilmente obtidos pela variação dos diâmetros das hastes, interpretados utilizando-se um gráfico semelhante ao da Figura 1, a qual corresponde a uma sonda com cinco segmentos. As sondas multi-haste segmentadas em estudo foram fabricadas em latão, com exceção dos trechos intermediários de diâmetro menor, de aço inoxidável. Com o auxílio das barras de tempo do equipamento TDR-Trase, pode-se obter o tempo de deslocamento do sinal eletromagnético na sonda ($\Delta t = t_{n+1} - t_n$). Na Figura 1, observa-se que t_1 é tempo no início da sonda (logo após o final do cabo coaxial) e t_5 é o tempo no final útil da sonda e, ainda, que os picos coincidem com o centro do trecho intermediário de diâmetro menor. Uma limitação pode ser visualizada nesta mesma figura, referente ao quinto e último segmento que não apresenta seu término evidenciado, prejudicando a determinação da umidade, motivo pelo qual a leitura do último segmento foi desprezada neste trabalho.

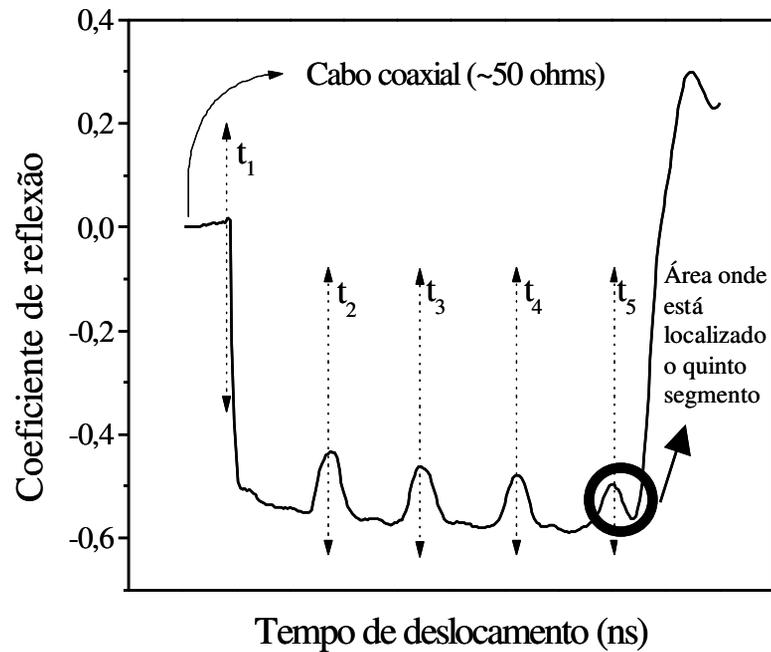


Figura 1. Esquema de interpretação da onda eletromagnética produzida por uma sonda multi-haste segmentada

O Δt do sinal eletromagnético na sonda foi convertido para Ka , por meio da equação abaixo, nos diferentes trechos (Soilmoisture, 1990).

$$Ka = \left(\frac{\Delta t \cdot c}{L} \right)^2 \quad (1)$$

donde,

Δt - Tempo de deslocamento (ns)

c - Velocidade da luz (0,30 m/ns)

L - Comprimento da haste (m)

As duas sondas desenvolvidas possuem 4 hastes com 0,675 m de comprimento e segmentação de 0,10 m e 0,20 m denominadas, respectivamente, Sonda 1 e Sonda 2. A Sonda 1 foi dividida em 7 segmentos e a Sonda 2 em 4 segmentos. As hastes foram construídas com o último segmento pontiagudo de 0,075 m de comprimento, promovendo um perfil útil para leitura de 0,60 m. O detalhamento da construção da sonda e suas dimensões, são apresentados na Figura 2.

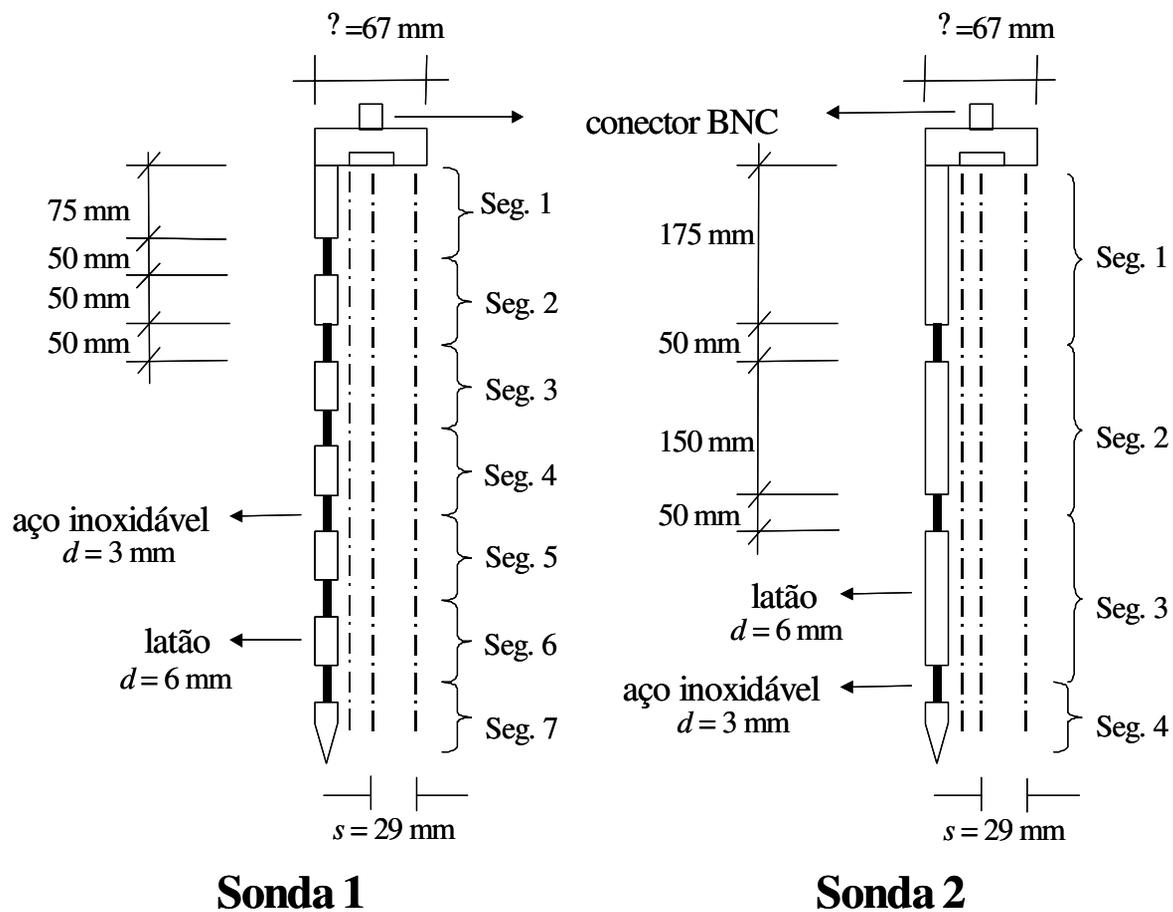


Figura 2. Esquema de segmentação das sondas 1 e 2, (Seg. = Segmento)

Avaliação do material construtivo da sonda: Conforme já descritas, as sondas desenvolvidas possuem parte de seus constituintes em latão, de menor custo de material e mão-de-obra, em relação ao aço inoxidável, que tem sido o material dominante na construção de sondas nos últimos anos, sendo recentemente substituído pelo latão (Noborio, 2001).

Com o intuito de confirmar e se conhecer novas vantagens de se usar hastes de latão em substituição ao aço inoxidável, realizou-se uma avaliação em laboratório, através de uma sonda do tipo “Waveguide Connector”, que possibilitou a troca das hastes contínuas (aço inoxidável/latão) para comparar leituras de K_a obtidas com as diferentes hastes que possuíam as mesmas dimensões, 6 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento.

O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho Distroférrico, coletado do campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP – SP, da camada de 0,0-0,20 m; posteriormente, o solo foi destorroado, secado ao ar e peneirado (peneira de 2 mm). As principais características físicas deste solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas do Latossolo utilizado

Camada (m)	Densidade do Solo (kg.m ³)	Porosidade Total (%)	Textura (g. kg ⁻¹)		
			Argila	Silte	Areia
0-0,25	1240	53,20	560	90	350
0,25-0,50	1230	53,70	610	80	310
0,50-0,80	1210	54,30	650	70	280

Para efetuar as determinações de Ka com as diferentes hastes, seguiu-se o procedimento descrito por Tommaselli (1997). Nesta metodologia, as etapas de umedecimento, com adição de 100 mL de água por etapa, foram continuamente repetidas, até se atingir umidades próximas à da saturação. O procedimento é explicado a seguir: metade da amostra de solo coletada, de cerca de 4 L, foi esparramada em uma mesa, formando uma fina camada de solo e, através de um pulverizador, adicionou-se cerca de metade da água desejada (50 mL); a seguir, a outra metade da amostra foi esparramada sobre a metade anterior, pulverizando-se com água até completar os 100 mL. O solo foi bem misturado e peneirado, de três a quatro vezes, em peneira de malha de 2 mm, obtendo-se sua homogeneização. Após o umedecimento e homogeneização, o solo foi colocado em um recipiente plástico, de cerca de 5 L de volume, compactado de modo a manter a sua densidade o mais uniforme possível. O recipiente com o solo foi pesado, o que permitia a obtenção do valor de densidade do solo úmido, valor este a ser utilizado na determinação da umidade do solo.

Impedância característica das sondas multi-haste segmentada: A impedância característica (Z_0 [Ω]) é o modo de se expressar a lei que relaciona a variação de voltagem e corrente, com distância ao longo de uma linha de transmissão uniforme, geralmente utilizada para se avaliar a performance de sondas de TDR. Em geral, sondas com Z_0 superior a 200 Ω são inadequadas para determinação da umidade do solo pois, neste caso, a reflexão prejudica a interpretação do sinal eletromagnético, inviabilizando a técnica. A Z_0 de uma linha coaxial de transmissão ideal depende exclusivamente da geometria da linha (Zegelin et al., 1989) e pode ser calculada por:

$$Z_0 = 60 \ln \left(\frac{2 \cdot s}{d} \right) \quad (2)$$

sendo:

s - Raio do condutor externo (m)

d - Diâmetro do condutor interno (m)

Segundo Zegelin et al. (1989) e Heimovaara (1993) pode-se medir Z_0 por determinação do coeficiente de reflexão da sonda (p) isto quando a mesma está envolta por um material dielétrico uniforme, através da expressão:

$$Z_0 = Z_u \cdot K^{0,5} \frac{(1+p)}{(1-p)} \quad (3)$$

que:

Z_u = Impedância no cabo $\sim 50 \Omega$

$$p = \left(\frac{V_1}{V_0} \right) - 1$$

Sendo V_0 a amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR, e V_1 a amplitude do sinal eletromagnético depois da reflexão do início da sonda.

Para as sondas em estudo, pôde-se estimar Z_0 usando-se a Eq. 2 através das dimensões de s e d e compará-lo com o medido na Eq. 3; além disso, adicionaram-se à avaliação, duas sondas comuns de TDR contínuas, respectivamente P1 e P2. As Sondas P1 e P2, comprimento $L = 0,10$ e $0,20$ m, respectivamente, foram adicionadas à avaliação, para oferecer critério e confiabilidade às discussões dos resultados, uma vez que são utilizadas em diversos experimentos, o que se levou a assumi-las como sondas ideais para estimativas de umidade do solo. O material dielétrico usado foi água destilada a 20°C ($K=81$).

Estimativa da umidade em condições de laboratório e de campo

Avaliação das sondas multi-haste segmentada em laboratório: A avaliação foi realizada com uma areia classificada como grossa, um meio poroso homogêneo que permitiu isolar-se os possíveis efeitos oriundos do meio, avaliando-se o efeito das diferentes configurações das sondas.

A areia foi secada ao ar para se obter a umidade baixa e, após, acondicionada em duas colunas de PVC, $0,25$ m de diâmetro e $0,9$ m de comprimento, de tal forma a obter uma densidade de 1650 kg.m^{-3} .

Após a instalação das sondas aplicou-se 1 L de água sobre a superfície da areia, por meio de um emissor (tipo gotejador) com 4 saídas e taxa de aplicação de 8 L.h^{-1} . Essas saídas

foram distribuídas uniformemente ao redor da sonda, obtendo-se uma boa homogeneidade do umedecimento da areia, de cima para baixo.

O processo dinâmico da água na areia foi monitorado durante 8 h através de leituras de K_a e se compararam os resultados obtidos. Para esta comparação, calcularam-se médias entre as umidades estimadas nos segmentos 1 e 2, 3 e 4 e 5 e 6, para a Sonda 1, podendo-se verificar e comparar o comportamento das estimativas de umidade em profundidades semelhantes entre as Sondas 1 e 2. Entendendo-se melhor o que foi realizado, teoricamente as sondas devem possuir o mesmo comportamento em relação ao posicionamento de seus picos, para uma condição dielétrica semelhante. Desta forma, os picos de impedância números 1, 2 e 3 da Sonda 2, devem ser coincidentes com os picos 2, 4 e 6, da Sonda 1.

Finalmente, determinaram-se os correspondentes valores de umidade volumétrica com base na curva de calibração, descrita por Topp et al. (1980).

Avaliação da sonda multi-haste segmentada em campo: Utilizou-se, neste ensaio, uma sonda semelhante à Sonda 2. Fez-se esta opção pelo fato dos resultados da avaliação em laboratório indicarem ser o uso desta confiável para se descrever a umidade do perfil do solo em profundidade superior a 0,40 m, quando comparado com a Sonda 1. O solo utilizado nesta etapa foi o Latossolo Vermelho Distroférrico, com as mesmas características descritas anteriormente.

Irrigou-se uma área experimental de 2 x 2 m elevando-se o máximo possível a umidade do solo, que correspondem a um valor de $0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e, em seguida, instalou-se a sonda. Este procedimento facilitou a instalação da sonda, pois a penetração das hastes seria dificultada pela dureza de solo argiloso seco, de tal forma que o paralelismo entre as hastes foi mantido, fator importante para a obtenção de um sinal eletromagnético com características de reflexão que viabilizem sua interpretação.

Durante o período de 10 dias tomou-se leitura diária das sondas que, em seguida, foram convertidas em constante dielétrica aparente do solo, nos diferentes trechos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Performance das sondas multi-haste segmentada

Avaliação do material construtivo da sonda: Verificou-se coeficiente de correlação satisfatório ($R = 0,99$) entre as leituras de K_a obtidas com diferentes materiais (aço inoxidável

versus latão) e coeficiente angular da equação de regressão próximo de 1 (Figura 3). Esses resultados tanto comprovam existir uma associação linear entre os materiais como indicam uma variação direta no valor de Ka do aço inoxidável, para uma unidade de Ka do latão, comprovando-se que suas características apresentam relação funcional na propagação de ondas eletromagnéticas, ao longo das hastes metálicas. Desta forma, hastes de latão podem substituir as de aço inoxidável, promovendo economia na construção de sondas de TDR, uma vez que o preço do latão é inferior à mesma quantidade de aço inoxidável e oferece maior facilidade operacional para serviços de usinagem.

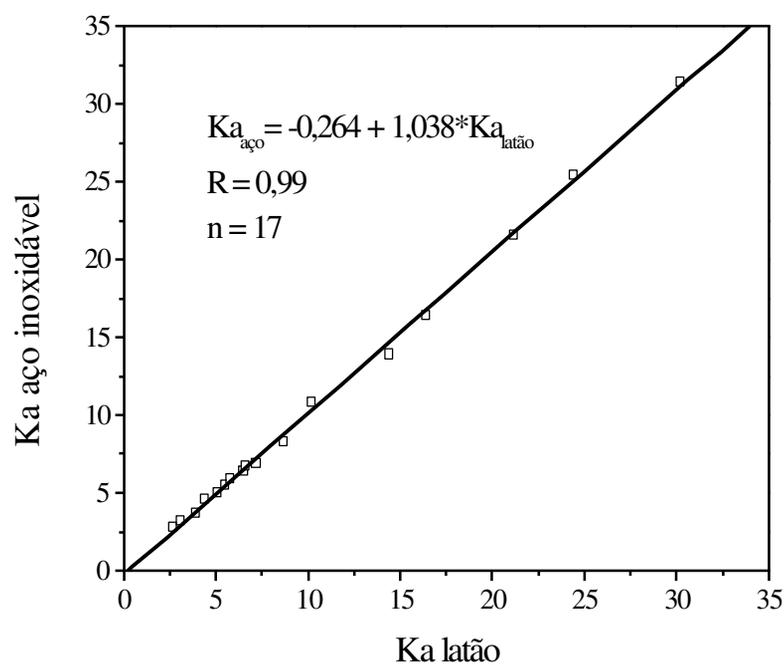


Figura 3. Correlação entre hastes de aço inoxidável e latão

Impedância característica das sondas multi-haste segmentada: São apresentados, na Tabela 2, os resultados da impedância característica das sondas em estudo. Analisando-se os resultados obtidos pela Eq. 2, observa-se que os valores calculados para as sondas multi-haste segmentadas são próximos aos valores das sondas comuns de TDR (P1 e P2). Assim, verificou-se, também, que as dimensões geométricas utilizadas são satisfatórias. Zegelin et al. (1989) apresentaram valores medidos de impedância que não ultrapassaram 173Ω para sondas multi-haste contínuas, com 4,76 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, valores estes considerados satisfatórios pelos autores.

Tabela 2. Impedância característica das sondas multi-haste segmentada

Sondas	Dimensões <i>s/d</i> , mm	Z_0 [Ω]	
		Geométrico Equação (1)	Medido Equação (2)
Sonda 1 (nº de seg.)			
1	29/6	136	171
2	29/6	136	170
3	29/6	136	169
4	29/6	136	168
5	29/6	136	167
6	29/6	136	166
Sonda 2 (nº de seg.)			
1	29/6	136	168
2	29/6	136	167
3	29/6	136	166
Sonda P1	10/2,1	135	198
Sonda P2	14/3,1	132	196

Observa-se, na Figura 4 que, para a Sonda 1, pode-se encontrar os picos de impedância não muito bem definidos devido ao fenômeno de reflexão, dificultando a leitura. Para ambas as sondas, porém, é possível verificar que o coeficiente de reflexão diminui com o aumento do tempo de deslocamento, sendo mais evidente na Sonda 1 dentro da área circundada, cujo fenômeno é provocado pela interface entre materiais de diferentes propriedades elétricas. Utilizando-se a Eq. 2 verifica-se uma impedância igual a 136 e 177 Ω para os segmentos em latão e aço inoxidável, respectivamente. Salienta-se que esta perda é causada pelo dimensionamento das hastes, que possuem diferentes materiais e geometria ao longo de seu comprimento; esta limitação dificulta a leitura para a determinação exata do pico de impedância causando, assim, erros na estimativa da umidade do solo. Segundo Heimovaara (1993) o problema deve agravar-se para solos secos e/ou salinos.

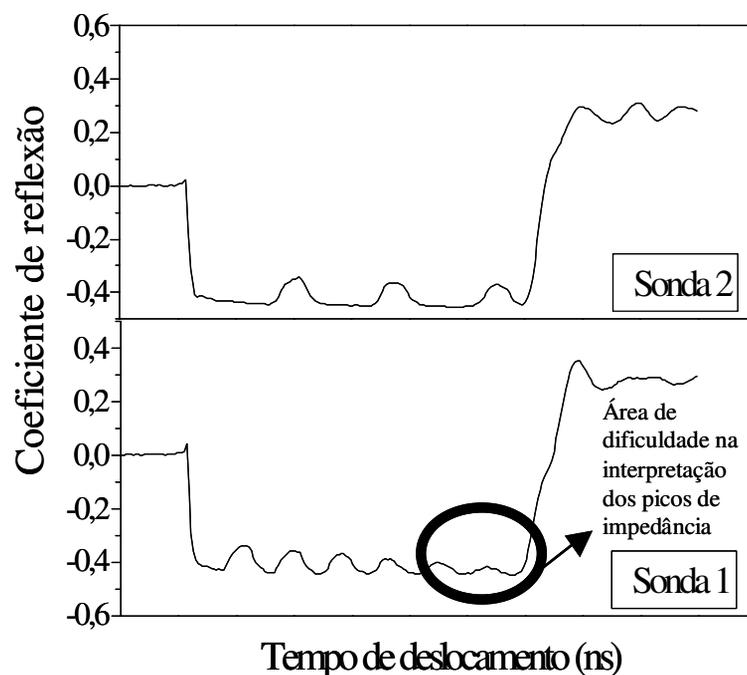


Figura 4. Comparação de leituras do tempo de deslocamento do sinal

Estimativa da umidade em condições de laboratório e de campo

Avaliação das sondas multi-haste segmentada em laboratório: Tem-se, na Tabela 3, uma comparação entre os principais resultados do monitoramento do processo de dinâmica da água em meio poroso, verificando-se que não há diferenças nas estimativas de umidade entre as diversas sondas, comprovando-se que ambas possuem características semelhantes na propagação de ondas eletromagnéticas ao longo da sonda; entretanto, observa-se também que, para a Sonda 1 e em sua extremidade, existe dificuldade na interpretação dos picos de impedância (Tabela 3); estes resultados confirmam as observações anteriores, mostrando que o número elevado de segmentações aumenta consideravelmente as reflexões do sinal. Em concordância com tais observações, Topp & Davis (1985) apresentaram resultados que salientam esta dificuldade de interpretação dos gráficos, quando foram utilizadas sondas com mais de cinco segmentos.

Tabela 3. Comparação entre resultados da umidade volumétrica (θ) em função do tempo para as Sondas 1 e 2

Tempo (h)	Umidade Volumétrica, $m^3.m^{-3}$					
	Camada (0 - 0,20 m)		Camada (0,20 - 0,40 m)		Camada (0,40 - 0,60 m)	
	Sonda					
	1	2	1	2	1	2
0:00	0,04	0,04	0,04	0,04	NE	0,04
0:10	0,14	0,13	0,04	0,04	NE	0,04
0:20	0,26	0,26	0,09	0,08	NE	0,04
0:30	0,21	0,21	0,17	0,17	NE	0,04
1:15	0,17	0,17	0,23	0,23	NE	0,04
3:10	0,14	0,14	0,20	0,20	NE	0,08
4:00	0,13	0,12	0,20	0,20	NE	0,10
5:00	0,13	0,12	0,18	0,18	NE	0,11
6:10	0,11	0,11	0,18	0,18	NE	0,12
8:00	0,11	0,11	0,18	0,18	NE	0,12

NE = Não estimado devido à dificuldade na interpretação dos picos de impedância

Foi possível identificar-se variações de umidade durante o movimento dinâmico da água no perfil de 0-0,60 m da coluna de areia. Verificou-se, para ambas as sondas, que a maior umidade ($0,26 m^3.m^{-3}$) na profundidade de 0,0-0,20 m ocorreu aos 20 min a qual, após 1 h, foi reduzido de forma rápida e, simultaneamente monitorou-se o movimento da água para a próxima camada (0,20-0,40 m). Após 3 h do início do ensaio observou-se acréscimo de umidade na última camada (0,40-0,60 m) apenas para a Sonda 2, cujo resultado, porém, não descarta por completo a Sonda 1, sendo possível sua utilização em perfis de até 0,40 m de profundidade com detalhamento da umidade solo, ou seja, a cada 0,10 m.

Avaliação da sonda multi-haste segmentada em campo: Observa-se, na Figura 5, a caracterização da umidade do perfil do solo em um processo dinâmico. Ocorreram sucessivas diminuições no armazenamento da água no solo e reposição de 8 mm por chuva entre os dias 5/9 e 6/9 (representada pela área hachuriada); estas variações foram identificadas no período estudado, aplicando-se a regra do trapézio (Libardi, 2000) para o cálculo das variações do armazenamento.

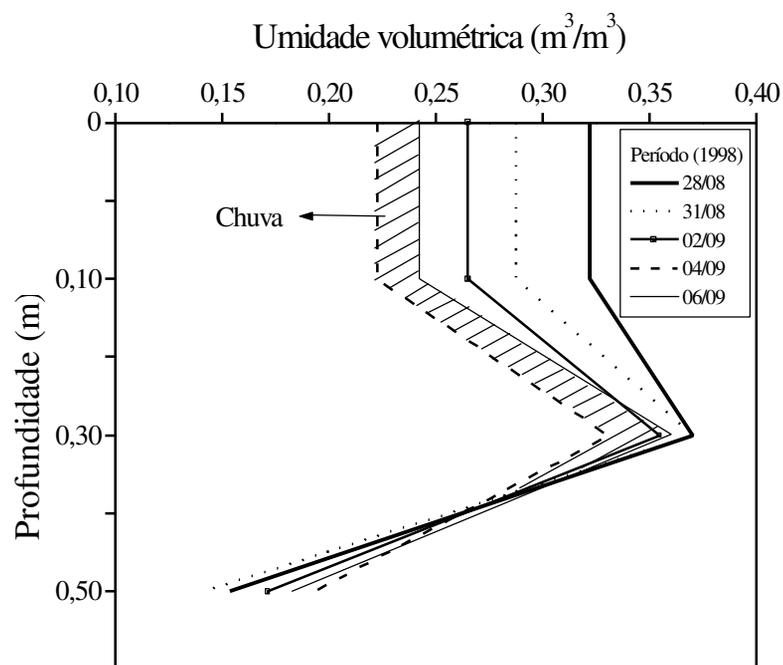


Figura 5. Variação da umidade no perfil do solo, ao longo do período estudado

Para trabalhos futuros sugere-se avaliar novas configurações de sondas com segmentos menores, possibilitando um detalhamento ainda maior da umidade em perfis de solo.

CONCLUSÕES

1. A utilização de hastes de latão em substituição às de aço inoxidável, mostrou ser satisfatória, do ponto de vista técnico-econômico.
2. As diferentes configurações das sondas utilizadas mostraram-se aptas para a determinação da umidade do solo em processos dinâmicos da água em laboratório e campo; entretanto, verificou-se limitação do uso de sondas segmentadas, de 0,10 m.
3. Existe viabilidade no uso de sondas multi-haste segmentadas, na estimativa da umidade de um perfil de solo.

AGRADECIMENTOS

À Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) pelo financiamento que permitiu a aquisição do equipamento TDR, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) pela concessão da bolsa de doutorado para o primeiro autor, e aos pesquisadores Dr. José Dalton Cruz Pessoa (CNPDIA/EMBRAPA) e Prof. Dr. Tadeu José Garcia Tommaselli (FCT/UNESP) pelo apoio técnico.

LITERATURA CITADA

- Coelho, E.F.; Or, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.39, p.2007 – 2016, 1996.
- Conciani, W.; Herrmann, P.S.P.; Machado, S.L.; Soares, M.M. O uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para determinação da umidade do solo *in situ*. Revista Solos e Rochas, São Paulo, v.19, p.189 – 199, 1996.
- Heimovaara, T.J. Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.57, p.1410 – 1417, 1993.
- Libardi, P.L. Dinâmica da água no solo. 2. ed. Piracicaba: P.L. Libardi, 2000, 509p.
- Noborio, K.; McInnes, K.J.; Heilman, J.L. Measurements of cumulative infiltration and wetting front location by time domain reflectometry. Soil Science, Baltimor, v.161, p.480-483, 1996.
- Noborio, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. Computers and Electronics in Agriculture, Amsterdam, v.31, p.213 – 237, 2001.
- Selker, J.R.; Graff, L.; Steenhuis, T. Noninvasive time domain reflectometry moisture measurement probe. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.57, p.934 – 936, 1993.
- Soilmoisture Equipment Corporation. Trase System I. Santa Bárbara: SoilMoisture Equipment Corporation, 1990, 53p.
- Souza, C.F.; Matsura, E.E.; Testezlaf, R. Desempenho de sondas multi-haste segmentada para o monitoramento da umidade do solo por meio da técnica de TDR. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 28, 1999, Pelotas. Resumos... Pelotas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1999. CD Rom.
- Tommaselli, J.T.G. Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time Domain Reflectometry). Piracicaba: ESALQ-USP, 1997, 167p. Tese Doutorado
- Topp, G.C. ; Davis, J.L.; Annan, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, Washington, v.16, p.574 – 582, 1980.

Topp, G.C.; Davis, J.L. Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): a field evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.49, p.19 – 24, 1985.

Zegelin, S.J.; White, I.; Jenkins, D.R. Improved fields probes for soil water content and electrical conductivity measurements using TDR. *Water Resources Research*, Washington, v.25, p.2367 – 2376, 1989.

Publicação II

A variable-volume multi-wire TDR probe for measuring water content distribution

(Soil Science Society of America Journal, submetido em fevereiro de 2002)

A VARIABLE-VOLUME MULTI-WIRE TDR PROBE FOR MEASURING WATER CONTENT DISTRIBUTION¹

Claudinei Fonseca Souza²; Dani Or³ & Edson Eiji Matsura⁴

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Trabalho financiado pela Fapesp - 98/04931-7 e 13819-6

² Doutorando em Tecnologia de Irrigação, Feagri/UNICAMP, Departamento de Água e Solo, CP 6011, 13081-970, Campinas, SP. E-mail: cfsouza@agr.unicamp.br

³ Professor do Departamento de Planta, Solo e Biometeorologia, USU/Utah

⁴ Professor do Departamento de Água e Solo, Feagri/UNICAMP

ABSTRACT

Management of favorable conditions for plant growth within a partially wet soil volume under drip irrigation present a measurement challenge. Often soil water information is obtained from a single or a few point measurements within the wet volume requiring various assumptions for their quantitative interpretation for irrigation decisions. We propose a new coaxial TDR probe capable of measurement of total soil water storage within well-defined soil volumes (referred to as the Variable Volume Coaxial Probe - VVCP). The measurement volume is determined by arrangement of conductors connected and arranged in a coaxial configuration with the variable spacing between inner and outer conductors determine average soil water content within concentric cylindrical soil volumes. VVCP was tested under laboratory and field conditions and compared with conventional 3-rod TDR probes. Waveforms and travel time analyses with the VVCP were similar to those obtained with standard 3-rod probes. Dielectric permittivity and resulting water content measurements from laboratory and field experiments were consistent with standard TDR probed and were independent of conductor spacing (i.e., measured soil volume). VVCP-determined water balance within partially wet soil volume was in excellent agreement with the volume of water applied indicating accurate and exhaustive volumetric measurement.

SONDA DE TDR MULTI-HASTE PARA ESTIMAR A DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA EM VOLUME DE SOLO VARIÁVEL: EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO

RESUMO

O manejo racional da água dentro do volume de solo explorado pelo sistema efetivo é um desafio. Frequentemente, o manejo é realizado a partir de um único (ou alguns) pontos de medidas da umidade dentro do volume de solo, este procedimento requer algumas suposições para a interpretação quantitativa do armazenamento da água para as decisões de irrigação. Nesse trabalho, propõe-se uma nova sonda de TDR capaz de estimar o armazenamento da água dentro do volume (integral e/ou parcial) de solo explorado (refere-se a sonda como: Sonda Coaxial de Volume Variável - VVCP). O volume de solo estimado é determinado a partir do arranjo de condutores (interno e externo), cuja configuração assemelha-se à linha de transmissão coaxial. A VVCP foi avaliada em laboratório e comparada com uma sonda convencional com 3 hastes. As formas gráficas das ondas eletromagnéticas da VVCP foram semelhantes às obtidas pela sonda convencional. Os resultados das estimativas de umidade do solo foram consistentes durante a comparação, independentemente da configuração da VVCP utilizada. A VVCP, também, estimou o balanço da água em volume integral e parcial do solo, demonstrando excelente concordância com o volume de água aplicado.

INTRODUCTION

Adequate estimation of average water content of wetted soil volumes is important for evaluation and proper management of drip irrigation systems. Measurements of the extent of wetted soil volumes are often made by either digging a trench or deploying a dense bank of sensors to monitor the spatial distribution of soil water content (Coelho and Or, 1997). Among presently available soil water monitoring techniques, time domain reflectometry (TDR) offers the most accurate and repetitive field method. TDR is able to do simultaneous measurement of water content and electrical conductivity in the same soil volume. The method capitalizes on the large disparity between the dielectric permittivities of water ($\epsilon_w = 81$) and other soil constituents such as air ($\epsilon_a = 1$) and soil solid particles ($\epsilon_s = 3-5$). Consequently, measured bulk dielectric permittivity (ϵ_b) is dominated by the water phase. Soil ϵ_b is determined from travel time of a step electromagnetic pulse along a buried waveguide (TDR probe). Conventional

TDR probes are comprised of two or three parallel metal rods completely embedded in the medium of interest (Topp et al., 1982b; Zegelin et al., 1989).

Topp et al. (1984) studied a hand probe used with a portable TDR instrument to measure water content of soil down the wall of soil pits to a depth greater than 1 m. The authors concluded that a portable TDR instrument applied to a hand probe in the form of a parallel pair transmission line gave an accurate and rapid measure for soil water content.

For water content profiling Topp and Davis (1985) designed a probe with step changes in rod diameter causing a step change in probe impedance and consequently a characteristic reflection at that point on the waveform. The travel time between these reflections defined the water contents in the regions between each discontinuity.

Zegelin et al. (1989) designed a probe based on a coaxial type to measure the water content at the ground surface. They observed that signals from the new probes permit more reliable and accurate volumetric water content determination and also that dielectric constant measurement are superior to two-wire probes with a balancing transformer.

Hook et al. (1992) designed a probe for profiling soil water with depth using two metal strips mounted on a plastic core where shorting diodes defined the various segments along the probe. Redman and DeRyck (1994) measured the soil water content profile with depth using a probe comprised of a PVC access tube with two metal rods attached to its exterior. Another profiling probe was designed by Ferré et al. (1998) using two short rods mounted on two parallel access tubes. Small diameter wires lead to the top of the measurement interval, limiting the sensitivity of the probe to the medium above the region of interest. Topp et al. (1982a) were successful at detecting the wetting front location during infiltration using TDR. A limitation of the procedure described by authors was that it required a long probe to determine the reflection of electromagnetic waves from the wetting front and probes of this length are sometimes difficult to insert into soil.

Other innovative probe designs include work by Selker et al. (1993) who used a surface-mounted antenna for noninvasive measurement of water content at the soil surface. The probe was composed of metal rods arranged in a serpentine configuration embedded in an acrylic body. Or and Wraith (1999) designed a new soil matric potential sensor (TM sensor) based on TDR. The sensor is constructed of porous disks having different pore size

distributions and encased in a coaxial cell. Experimental results showed consistent relationships between volumetric water content and soil matric potential of TM sensors.

Probes for volume measurements are desirable for management of drip irrigation systems due to the non-uniform soil volume wetting and highly dynamic changes in soil water status within different parts of the plant-rooting zone. Coelho and Or (1997) discussed aspects of wetted volume sensing as compared with point measurements and highlighted their importance for proper management and establishment of automatic irrigation threshold values under non-uniform wetting conditions induced by drip irrigation. The primary objective of this study was to develop and test a new TDR probe design termed the *variable volume coaxial probe* (VVCP) for sensing soil water content in partially wetted volumes.

Theoretical considerations

The new probe was designed to measure the average volumetric water content within a wetted soil volume confined within a coaxial transmission line formed by concentric arrangement of VVCP conductors (rods). The use of transmission lines for dielectric measurements is well-established (Bussey, 1980) using a variety of waveguides ranging from simple parallel wires to fully coaxial designs. The coaxial design has the advantage that the electrical field is confined between the inner and outer conductors and it propagates in a *transverse electromagnetic* (TEM) mode, which is the simplest form of guided wave propagation. Consequently, the measurement is confined to a sample that fills the coaxial gap between inner and outer conductors. Such a design has been used in numerous studies such as to measure dielectric properties of rocks (Kraft, 1987), and by the National Bureau of Standards to measure the dielectric properties of soils and agricultural materials (Bussey, 1980).

Design of the VVCP is shown schematically in Figure 1. The transmission line consists of a 2-m long, 50 ohms coaxial cable leading from the cable tester directly to the probe. The probe conductors all of length L are parallel and coplanar. The design consists of 12 stainless rods of 3 mm diameter. The outer conductor comprised of 6 rods is inserted around the perimeter of the cylindrical measurement volume, and the inner conductor is formed by the other 6 rods concentrically located near the center of the probe. The inner and outer conductors were soldered directly to the inner and outer conductor of the TDR coaxial

cable, respectively. The diameters of inner and outer conductors are denoted in Figure 1 as a and b , respectively. A unique feature of the VVCP design is that the dimensions of both a and b can be varied to facilitate measurement of soil water content within different soil volumes.

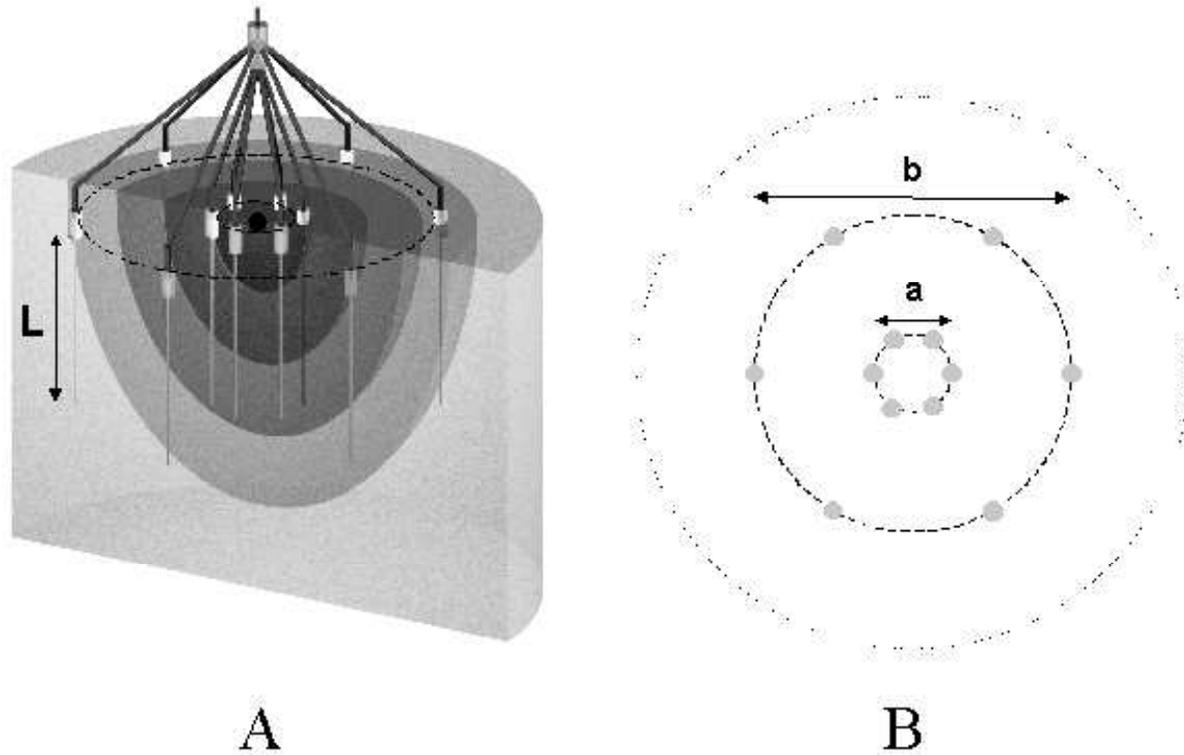


Figure 1. Design of a VVCP. a and b are the inner and outer diameter of the conductors, respectively. $L=0.26$ m is the probe length embedded in the soil

MATERIAL AND METHODS

Two types of experiments were conducted in the laboratory. First, we studied the behavior and performance of the new coaxial probe; subsequently we used the VVCP to determine volumetric water content under uniform and non-uniform conditions.

Electromagnetic performance of the VVCP

The VVCP characteristic impedance (Z_0 [ohms]) was used to evaluate the electromagnetic performance of the probe and compared to an ideal coaxial design. The impedance of a transmission line is a function of its geometry (spacing and diameter of conductors) and the dielectric constant of the medium surrounding the probe. The characteristic impedance for an ideal coaxial transmission line is (Kraus, 1984):

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_b}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (1)$$

where ϵ_b is the dielectric constant of a material surrounding the transmission line, a and b are the diameter of the inner and outer conductors, respectively. In practice, one can measure Z_0 from the reflection coefficient ρ_{ref} measured when the probe is filled with a uniform material of known dielectric constant ϵ_b (Zegelin et al., 1989):

$$Z_0 = Z_u \sqrt{\epsilon_b} \left(\frac{1 + \rho_{\text{ref}}}{1 - \rho_{\text{ref}}} \right) \quad (2)$$

$$\rho_{\text{ref}} = \left(\frac{V_1}{V_0} \right)_{\text{ref}} - 1 \quad (3)$$

where Z_U is the load Impedance (≈ 50 ohms for Tektronix 1502B cable tester), V_1 is the voltage of the measured waveform in the medium, and V_0 is the initial voltage of the waveform prior to travel in the medium. We obtained estimates of Z_0 for the VVCP from 20 different combinations of a and b (Table 1) using equations (1) and (2). We then compared these results to a standard 3-rod TDR probe under the same conditions (distilled water at 20°C, $\epsilon=81$).

Additionally, the shape and several characteristics of VVCP waveforms were analyzed for electromagnetic performance.

Table 1. Comparison of probe characteristic impedance

Probe	Diameter (m)		Volume (m ³) L=0.26 m	Characteristic Impedance Zo (ohms)	
	Inner, <i>a</i>	Outer, <i>b</i>		Geometric	Measured
VVCP					
1	0.04	0.07	0.003	34	77
2	0.04	0.10	0.007	55	109
3	0.04	0.15	0.017	79	139
4	0.04	0.20	0.031	97	158
5	0.04	0.30	0.072	121	186
6	0.04	0.40	0.129	138	205
7	0.07	0.10	0.004	21	63
8	0.07	0.15	0.014	46	100
9	0.07	0.20	0.029	63	114
10	0.07	0.30	0.069	87	150
11	0.07	0.40	0.127	105	169
12	0.10	0.15	0.010	24	75
13	0.10	0.20	0.024	42	95
14	0.10	0.30	0.065	66	124
15	0.10	0.40	0.122	83	150
16	0.15	0.20	0.014	17	74
17	0.15	0.30	0.055	41	106
18	0.15	0.40	0.112	59	127
19	0.20	0.30	0.041	24	91
20	0.20	0.40	0.098	42	115
<i>3-rod</i>	<i>0.0032</i>	<i>0.027</i>	<i>0.001</i>	<i>128</i>	<i>197</i>

Measurements of changes in soil water content

Observations of water content within the wetted soil volume under uniform and non-uniform wetting were conducted in a Millville silt loam soil (Or and Hanks, 1992), in the lab and in the field. The air-dried soil was passed through a 2-mm sieve and packed in a large plastic bucket (with diameter of 0.50 m and height of 0.50 m). In all experiments the soil was packed to attain an average bulk density of 1,300 kg/m³. A Mariotte device was used to uniformly wet the soil surface by ponding, and later by application from a dripper with a flow rate of 2 L/h to obtain a non-uniform wetting condition. Changes in soil water content were monitored by measurement of soil ϵ_b . Measurements were made with a Tektronix 1502B cable tester (Tektronix Inc., Beaverton, Oregon) equipped with a RS 232 computer interface. The TDR trace analysis was done automatically by a computer program (WinTDR, 1999). The

Topp et al. (1980) equation was used to calculate volumetric water content, θ , from TDR measured ϵ_b .

Uniform soil water content: Starting with a saturated soil, we let the water content gradually decrease and measured changes in soil water content using the VVCP and a 3-rod probe during 35 days. The top surface was divided into 64 grid cells (0.0025 m² each) and a 3-rod probe was sequentially inserted in each cell to obtain a “point” value of water content. These 64-point values provided a reference for comparisons with the volume average VVCP measurements. The comparisons were made using average water content measured from point values representing different volume combinations of a and b similar to those shown in Table 1.

Non-uniform soil water content: The soil surface was wetted using a dripper with a flow rate of 2 L/h. In the laboratory experiments we applied the following discrete water volumes of 1, 2, 3, 4 and 8 L at 1-day intervals. We conducted a field experiment in a drip-irrigated corn field by applying 20 L of water in a single event. Soil water dynamics was monitored using the VVCP, where in the laboratory we obtained measurements at 8 h intervals, and in the field every 4 days. Details of the various combinations and monitoring volumes are presented in Table 2.

Table 2. Conductor configurations and soil volume combinations measured by VVCP

VVCP	Diameter, m		Volume, m^3
	Inner a	Outer b	
C1	0.02	0.06	0.0026
C2	0.02	0.10	0.0078
C3	0.02	0.14	0.0157
C4	0.02	0.18	0.0251
C5	0.02	0.24	0.0467

RESULTS AND DISCUSSION

Electromagnetic performance of the VVCP

Waveforms measured with the VVCP: Figure 2 depicts a waveform collected using the VVCP with rod length = 0.26 m, inner spacing $a = 0.04$ and outer spacing $b = 0.30$ m embedded in soil. The reflection coefficient as a function of TDR signal travel distance is

shown. The points t_1 and t_2 correspond to signal reflection at entry (probe top) and end of probe, respectively. The propagation velocity is determined from these features, and subsequently used to determine the bulk dielectric constant of the medium. The measured water content with the attached waveform was $0.39 \text{ m}^3/\text{m}^3$ and it agreed well with standard 3-rod probe measured water content of $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (more detailed comparisons will be discussed later). A key feature for providing concurrent measurements of electrical conductivity (EC) is the behavior of VVCP waveform attenuation as a function of bulk EC (A sample of waveform measured with solution EC of 2.08 dS/m is shown in Figure 2).

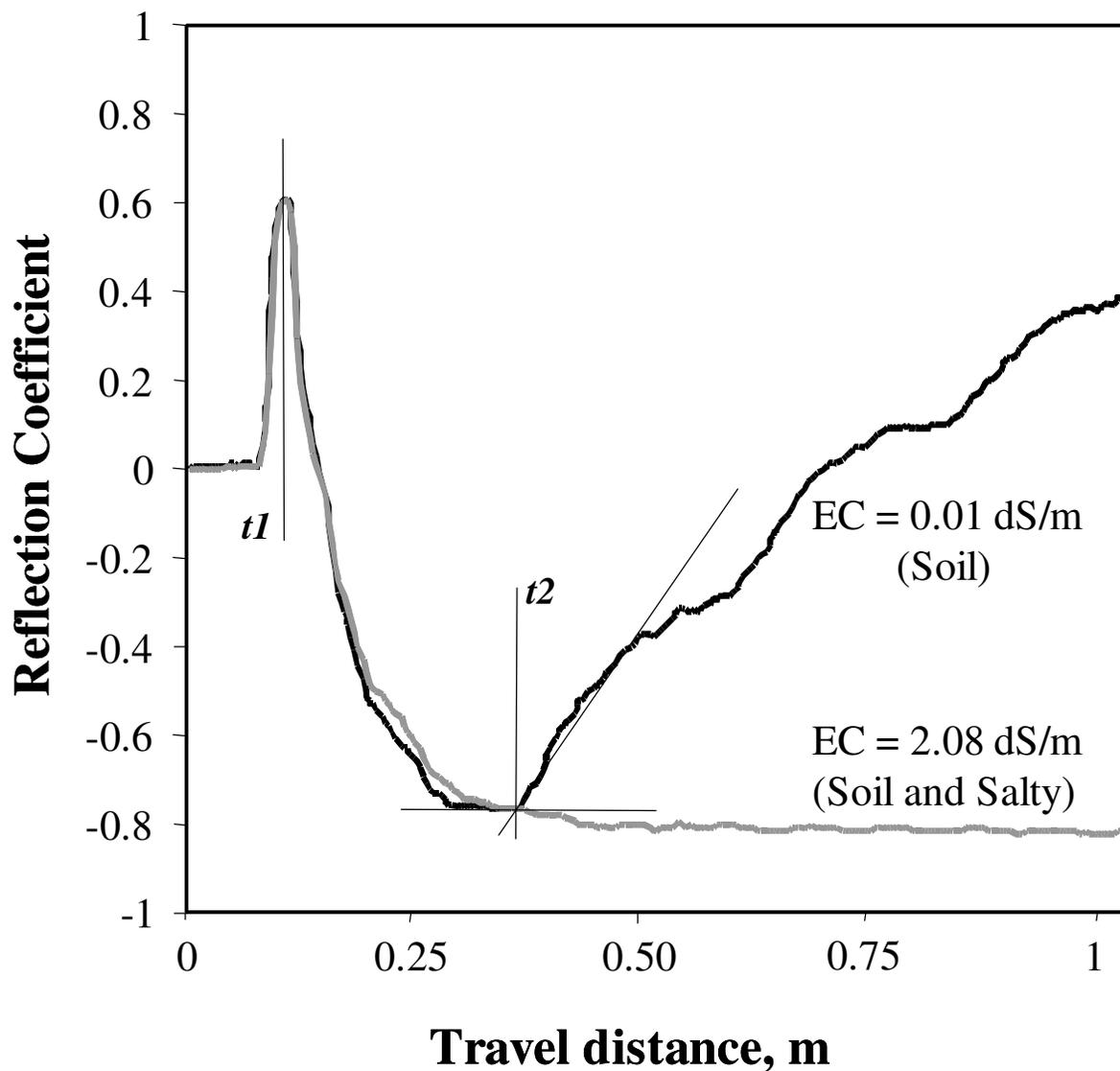


Figure 2. Sample waveform collected with VVCP

Characteristic impedance: Table 1 shows a comparison between geometrically calculated (equation 1), and measured (equation 2) characteristic impedance for different VVCP dimensions (volumes).

The results show an increase in characteristic impedance value (measured and calculated) with increasing diameter ratio b that was also proportional to measured soil volume. The increase in characteristic impedance with larger probe volumes may cause an increase in attenuation of the end reflection, thus making it difficult to analyze waveforms. Combination #6 ($a=0.04$ and $b=0.40$ m) resulted in the highest measured impedance (205 ohms) close to the value of the 3-rod probe (197 ohms).

The geometric equation for the characteristic impedance of a coaxial transmission line (equation 1) predicts that a plot of Z_0 vs. $\ln(b/a)$ is a line with a slope of 60 and intercept zero. The line through the data points of measured Z_0 vs. $\ln(b/a)$ depicted in Figure 3 has the correct slope of 60, however, there is a nearly constant offset of about 60 ohms between measured and geometric calculations (i.e., to match predictions with measurements we need to add 60 ohms to predicted impedance values). The reasons for the offset are not clear; we speculate that the combined effects of non-ideal coaxial geometry and the high dielectric constant used for Z_0 determination (distilled water) may have contributed to the deviation. Nevertheless, the results provide a means for determining the VVCP characteristic impedance for any volume (or inner and outer radii) using: $Z_{0_VVCP}=(Z_{0_geometric} + 60 \text{ ohms})$.

Summarizing the electromagnetic performance, the VVCP characteristic impedance seems to provide reasonable performance similar to a coaxial probe for all 20 combinations of a and b used. The results showed consistency having an offset of about 60 ohms for all compared impedance values and the highest measured impedance was 205 ohms, being very close to a standard 3-rod probe (197 ohms).

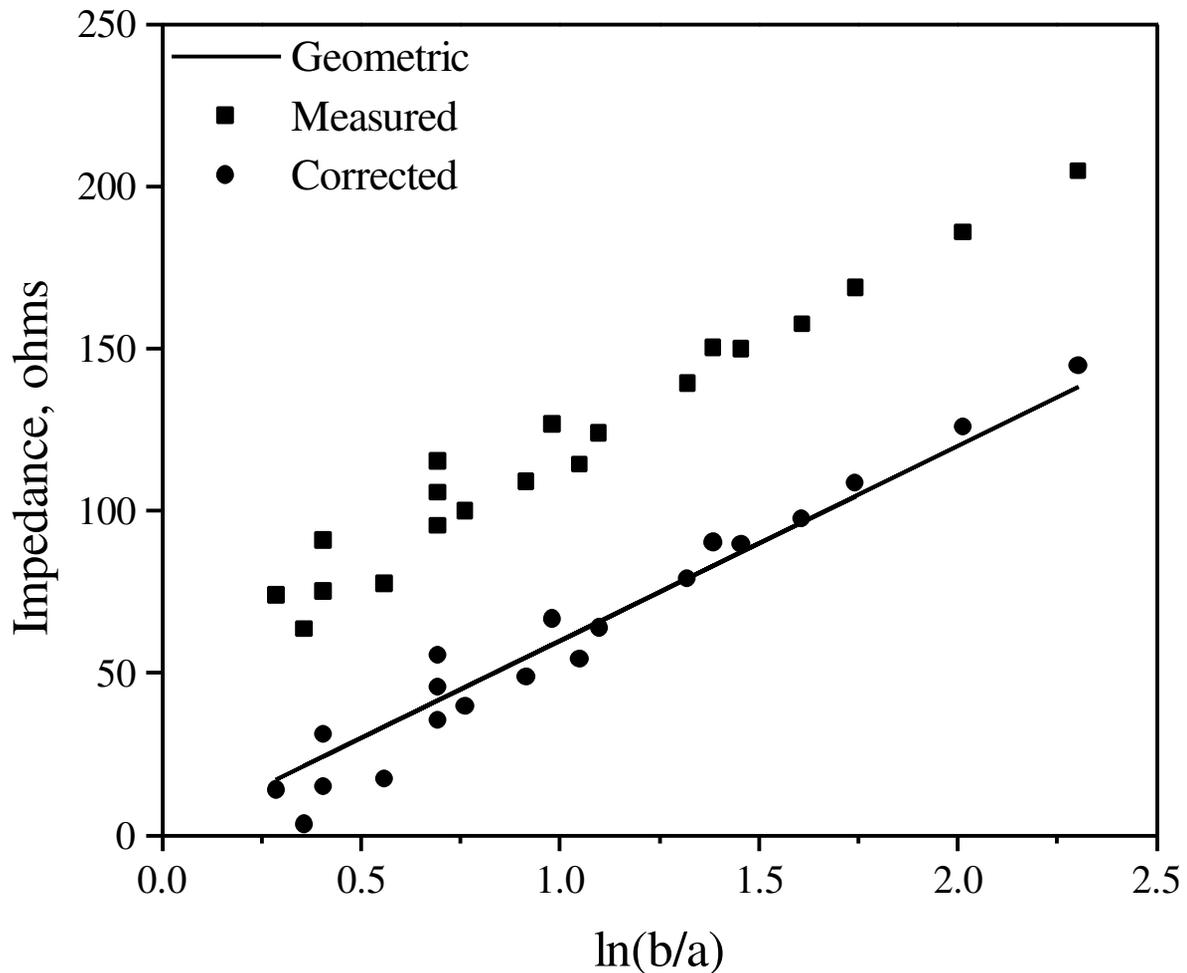


Figure 3. Magnitude of Z_0 as a function of the inner and outer diameter ratio ($\ln(b/a)$)

Soil water content measurements for uniform spatial distribution

Soil water content measured over time (Figure 4A), illustrates the agreement between the VVCP probe and a conventional 3-rod probe. The greatest measurement deviations are shown for water contents lower than $0.09 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Figure 4A). It is important to remember that the results in Figure 4 represent averages over the various VVCP configurations (Table 1), which became progressively difficult to change as the soil became drier. In some instances the repeated installation resulted in small air gaps that could explain some of the discrepancy shown in Figure 4A. Further comparison between the VVCP and 3-rod probe measurements of volumetric water content for a uniform water application is shown in Figure 4B. The correspondence between the two sets of measurements taken during the redistribution phase is nearly 1:1 (with coefficient of determination $R^2 = 0.99$) suggesting that VVCP measurement is comparable to a standard 3-rod probe for water content determination in uniformly wet soil.

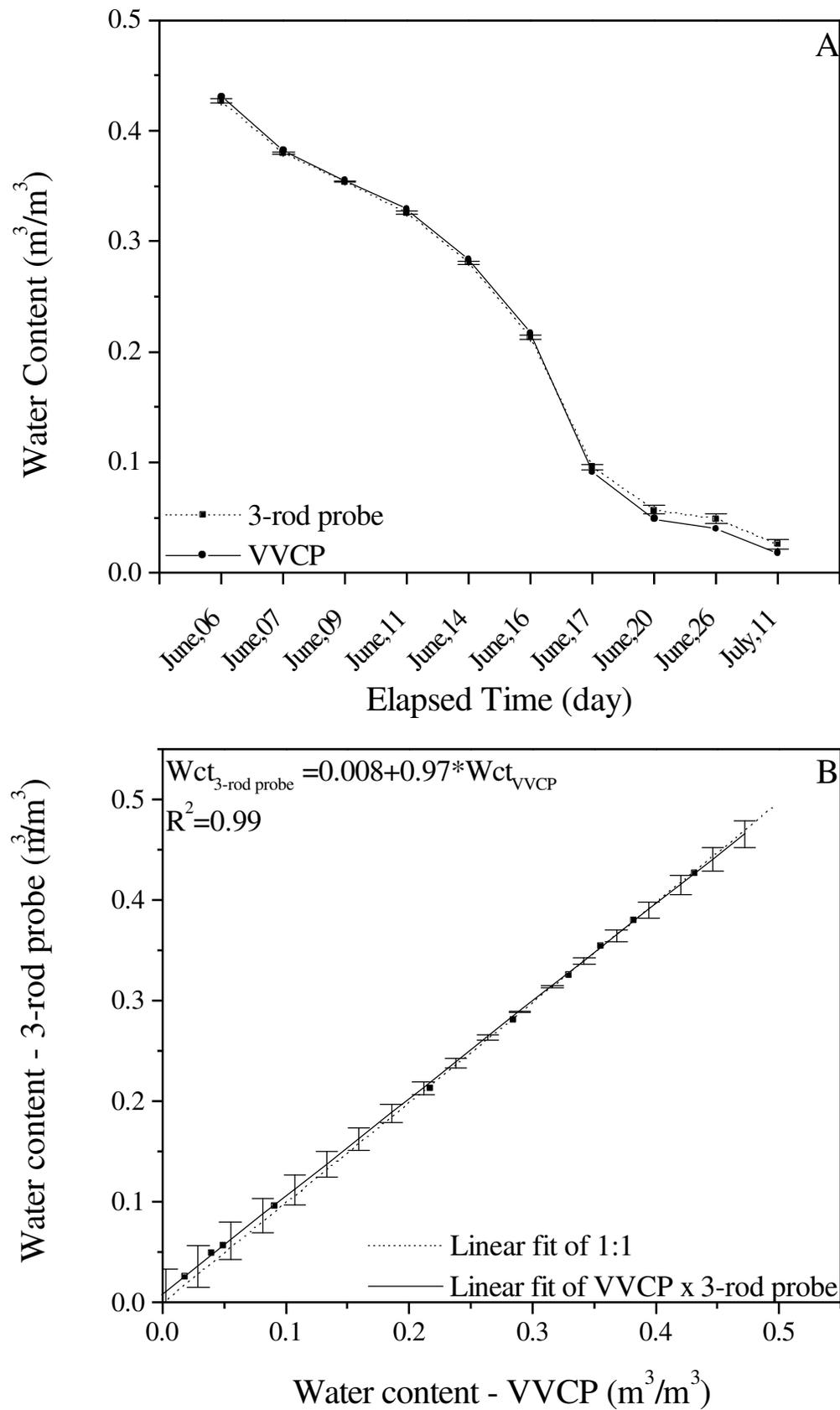


Figure 4. Measured water dynamics (A) and comparison of volumetric water content (B) determined from VVCP *versus* measurements using 3-rod probe

Soil water content measurements for non-uniform spatial distribution

Laboratory measurements: For this series of experiments water was applied to the soil surface from a single emitter (flow rate of 2L/h) to induce in a radially distributed water content pattern. Figure 5 summarizes measurements of soil water dynamics during a 40 hour period with incremental addition of water as indicated on the x-axis. Application times were 0.5, 1, 1.5, 2, and 4 hours for the cumulative volumes of 1, 2, 3, 4, and 8 L. The result show water redistribution between application events. The water content distribution characteristic of drip irrigation is evident from the VVCP measurements that incorporate progressively larger soil volumes from the C1 configuration (~3L of soil) to the C5 configuration (~47L of soil, see Table 2). As the soil volume sensed by the VVCP increases, the average water content measured is lower because of the larger fraction of initially dry soil included in the progressively larger measurement volume.

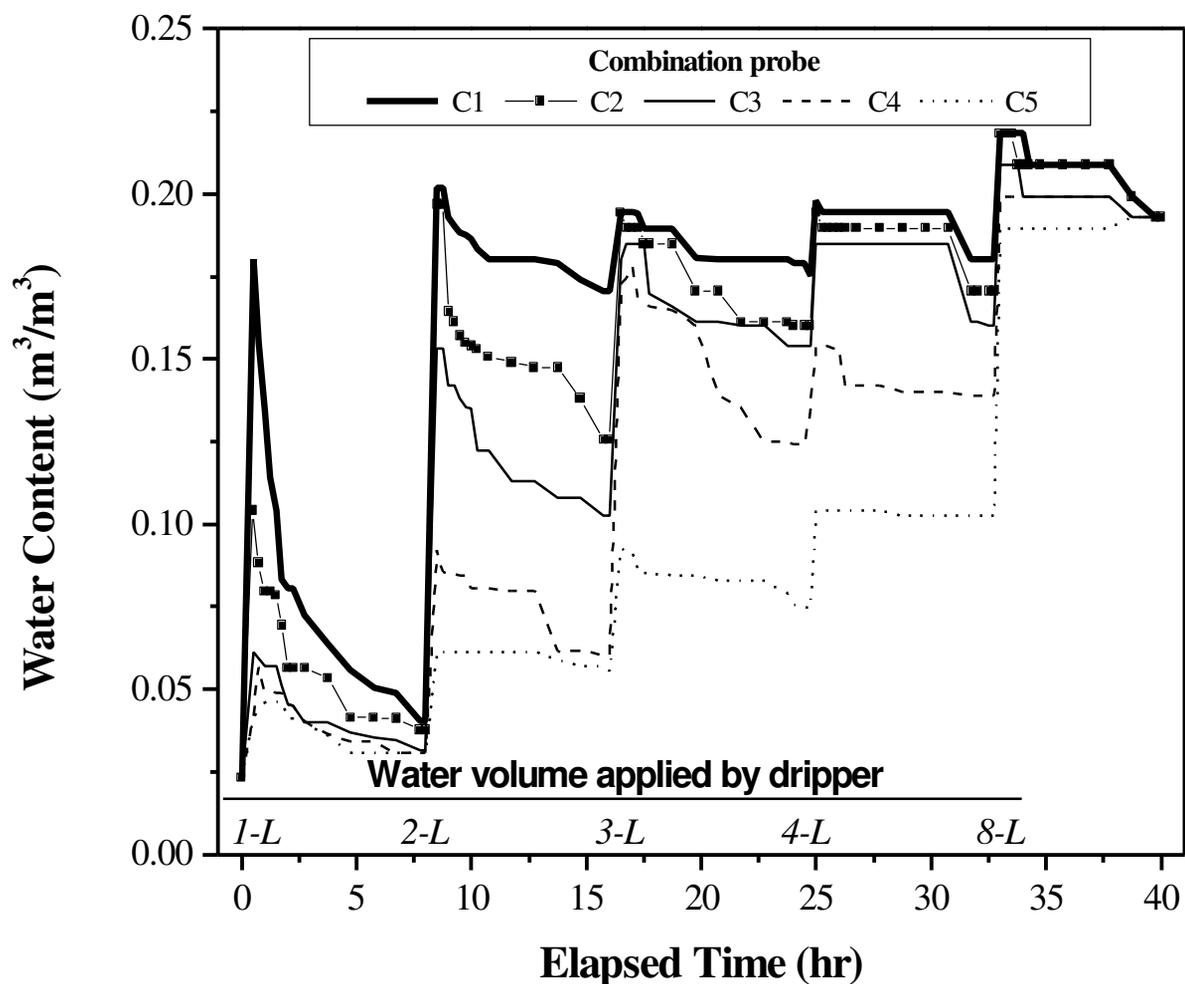


Figure 5. Measured water dynamics in different soil volumes.

To evaluate the mass balance between water applied and soil water volume sensed by the VVCP under non-uniform spatial distribution, we have chosen to use measurements taken with the C5 configuration (the largest soil volume measured). The resulting average water contents and equivalent volumes of water sensed (the product of volumetric water content and soil volume) after application of 1, 2, 3, 4, and 8 L of water are shown in Table 3. All water volume calculations were corrected for the initial water content ($\theta_i = 0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Soil surface was covered by a plastic film to reduce evaporative losses during the experiments. The results in Table 3 show good agreement between water volume applied and measured in the soil. The small and constant discrepancy observed between VVCP-measured and applied water volumes of about 0.07 L is attributed to the unmeasured soil volume in the core of the VVCP probe (i.e., soil volume enclosed by inner conductor as can be seen in Figure 1B). This difference requires a small correction that can be applied at the onset of the experiment or monitoring period.

Table 3. Volumetric water content and soil water volume measured by VVCP in the C5 configuration (soil volume = 47 L)

Applied Water Volume (L)	Measured Water Content m^3/m^3	Soil Water Volume L	Difference (Applied- Measured) L
1	0.020	0.934	0.066
2	0.041	1.933	0.067
3	0.063	2.929	0.070
4	0.084	3.929	0.071
8	0.170	7.928	0.072

Field conditions: The dynamics of water redistribution and evapotranspiration in a wetted soil volume in the field experiment was monitored during 4 consecutive days after application of 20 L of water from a dripper. The results depicted in Figure 6 show that total water storage in the partially wetted soil volume decreased with elapsed time since the end of irrigation. It can also be seen that increasing the measurement volume results in lower average soil water content as expected from incorporation of larger proportions of drier soil into the measurement soil volume. From geometrical considerations, it is evident that a given wet soil volume contained in progressively larger cylindrical measurement volumes sensed by the different

VVCP configurations would result in progressively lower values of average water content as seen in Figure 6. The field results confirm our laboratory findings and show that VVCP measurements are reliable and can be used for field measurement of partially-wet soil volumes.

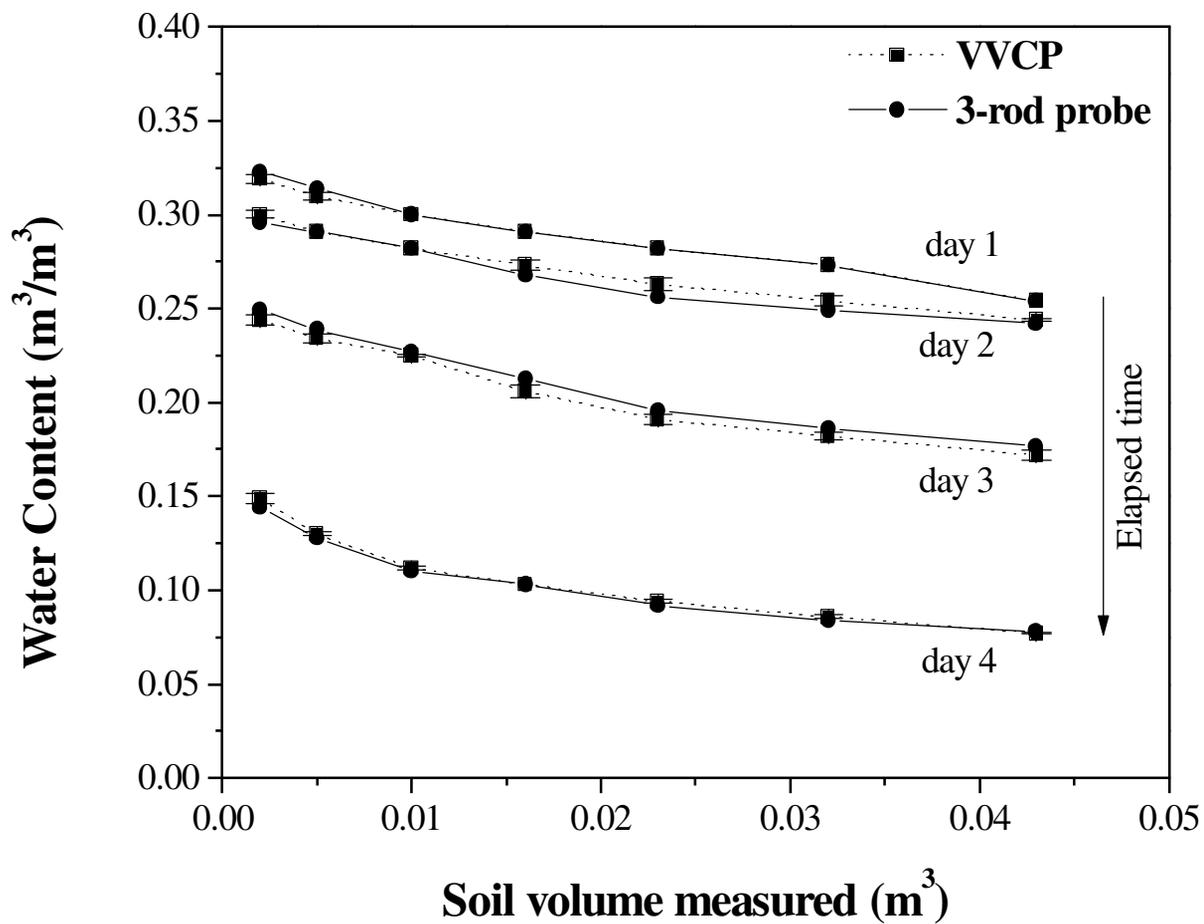


Figure 6. Evolution of the wetting front under field conditions

POTENTIAL APPLICATIONS OF THE VVCP

We envision several potential applications for the proposed VVCP, with the primary among these stemming from the original motivation for the study, namely the use of a single probe to monitor water and solute mass emitted from a point source. These lead to practical applications involving integration of soil water status in crop rooting zones, which receive non-uniform wetting as applied by drip and micro-irrigation. In addition to monitoring applications, the VVCP offers unique capabilities as a controller for maintaining predetermined water storage or average water content within a given measurement volume (defined by the VVCP deployment volume). This capability could be useful for a developing

orchard with young trees (or vines) whose rooting volumes evolve with time and require different amounts and volumes of water and fertilizer with time.

The VVCP can be used for lateral profiling of soil water distribution around a point source by using various coaxial configurations to differentiate soil water conditions at different radial slices or soil volumes. Finally, we speculate that many other applications in the wood and construction industry requiring determination of water content in large volumes of porous media (wood, concrete, etc.) could benefit from the availability of a probe capable of interrogating such large volumes.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

We designed and tested of a new TDR probe (termed a Variable Volume Coaxial Probe or VVCP) for measurement of water content and electrical conductivity in partially wetted soil volumes. Coelho and Or (1997) emphasized the need for such volume averaging measurement capability for irrigation management in partially wetted soil volumes such as by drip irrigation. The VVCP comprised of 12 stainless steel rods (3 mm diameter) arranged in the measurement volume in a coaxial transmission line configuration with 6 rods forming the outer shell, and the other six rods forming the inner coaxial core.

Experimental results show consistent relationships among measured water content by VVCP and by standard 3-rod TDR probes at different soil volumes and exhibiting a similar dynamic response. The following conclusions may be drawn from the results: (i) waveforms measured with the VVCP were similar to those obtained with standard 3-rod probes; (ii) measured characteristic impedance of the VVCP for different combinations was similar to geometrically calculated value except for a constant shift of 60 ohms due to the non-ideal probe geometry such that the resulting characteristic impedance could be expressed as $Z_{0_VVCP}=(Z_{0_geometric} + 60 \text{ ohms})$; (iii) the VVCP was capable of maintaining a water balance to within less than 90% for uncorrected measurements, and could easily be improved to nearly 98% considering the unmeasured core of the coaxial probe; (iv) an important attribute of the proposed VVCP is the determination of volume-averaged water content and its dynamics around a dripper using a single measurement. No other method presently used for drip irrigation management can provide such information (neutron probe cannot measure near the surface, other TDR applications require multiple probes and averaging). Our conclusions

suggest that future research should focus on evaluation of VVCP for other soil types and variable water content contrasts (e.g., drip irrigation in a relatively wet soil).

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported in part by Grant 98/04931-7 and 98/13819-6 from Fapesp – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – Brazil. Special thanks to Alberto Colombo, Markus Tuller, Teamrat Ghezzehei, Scott Jones, Bill Mace and Vaughn Thacker for their able assistance during various phases of the study. The support of USU (Utah State University) and the Israel-US Binational Agricultural Research and Development Fund (BARD) through grant no. IS-2839-97 is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- Bussey, H. E. 1980. Dielectric measurements in a Shielded open-circuit coaxial line. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 29:120-124.
- Coelho, E. F., and D. Or. 1997. Applicability of analytical solutions for flow from point sources to drip irrigation management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1331-1341.
- Ferré, P. A., D. L. Rudolph, and R. G. Kachanoski. 1998. Water content response of a profiling time domain reflectometry probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:865-873.
- Hook, W. R., N. J. Livingston, Z. J. Sun, and P. B. Hook. 1992. Remote diode shorting improves measurement of soil water by time domain reflectometry. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56:1384-1391.
- Kraft, C. 1987. Constitutive parameter measurements of fluids and soil between 500 KHz and 5 MHz using a transmission line technique. *J. Geophys. Res.* 92:10,650-10,656.
- Kraus, J. D. 1984. *Electromagnetics*. McGraw-Hill, New York.
- Or, D., and R. J. Hanks. 1992. Soil water and crop yield spatial variability induced by irrigation non-uniformity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:226-233.
- Or, D., and J. M. Wraith. 1999. A new soil matric potential sensor based on time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 35:3399-3407.
- Redman, J. D., and S. M. ReRyck. 1994. Monitoring nonaqueous phase liquids in the subsurface with multilevel time domain reflectometry probes. *Proc. of Symp. and Worksh. on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications*, Evanston. 7-9 Sept. 1994. U. S. Bur. of Mines, Northwestern University, Evanston, IL.

- Selker, J. S., L. Graff, and T. Steenhuis. 1993. Noninvasive time domain reflectometry moisture measurement probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:934-936.
- Tektronix. 1987. Tektronix metallic TDR's for cable testing. Tektronix Appl. Note. Tektronix, Redmond, OR.
- Topp, G. C., J. L. Davis, and A. P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16:574-582.
- Topp, G. C., J. L. Davis, and A. P. Annan. 1982a. Electromagnetic determination of soil water content using TDR. I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:672-678.
- Topp, G. C., J. L. Davis, and A. P. Annan. 1982b. Electromagnetic determination of soil water content using TDR. II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:678-684.
- Topp, G. C., J. L. Davis, W. G. Bailey, and W. D. Zebchuk. 1984. The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe. *Can. J. Soil Sci.* 64:313-321.
- Topp, G. C., and J. L. Davis. 1985. Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:19-24.
- WinTDR99. 1999. Time Domain Reflectometry soil sample analysis program. (Available on-line with updates at <http://psb.usu.edu/wintdr99/index.html>.)
- Zegelin, S. J., I. White, and D. R. Jenkins. 1989. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 25:2367-2376.

Publicação III

Application of the TDR technique in tropical soil

(TDR2001-Innovative Applications of TDR Technology. 5 a 7 de Setembro de 2001. Evanston, Illinois-EUA. (Versão em português - Calibração do Equipamento da TDR para um Latossolo Vermelho Distroférico)

CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO DA TDR PARA UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO¹

Claudinei Fonseca Souza² & Edson Eiji Matsura³

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Trabalho financiado pela Fapesp - 98/04931-7 e 13819-6

² Doutorando em Tecnologia de Irrigação, Feagri/UNICAMP, Departamento de Água e Solo, CP 6011, 13081-970, Campinas, SP. E-mail: cfsouza@agr.unicamp.br

³ Professor do Departamento de Água e Solo, Feagri/UNICAMP

RESUMO

Uma das recentes tecnologias desenvolvidas para determinação da umidade do solo é a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), onde se recomenda o levantamento de uma curva de calibração para cada tipo de solo. Este trabalho teve como objetivo, determinar a calibração do equipamento da TDR para um Latossolo vermelho distroférico. A partir de um procedimento experimental, onde se obteve dados de laboratório e campo, determinou-se a seguinte equação, que relaciona a umidade (θ) e a constante dielétrica aparente (K_a), $\theta = -0,0603 + 3 \times 10^{-5} K_a - 0,0017 K_a^2 + 0,0415 K_a^3$. Esta equação foi comparada com três equações encontradas na literatura, entre elas a de Topp et al. (1980) reconhecida como universal. A equação de calibração obtida explicou satisfatoriamente a variação da umidade do solo em laboratório.

INTRODUÇÃO

A técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) é uma forma indireta para estimar a umidade volumétrica do solo, θ . Assim sendo, o uso de uma equação de calibração torna-se imprescindível para a conversão da constante dielétrica aparente, K_a , em θ . Topp et al. (1980) propôs um método empírico para essas relações, baseando-se em um polinômio de terceira ordem:

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} K_a - 5,5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} K_a^3$$

De acordo com a literatura, esta equação pode ser usada como uma equação de calibração universal para a estimativa da θ . Apesar de considerar vários tipos de solos, a equação não promove bons ajustes para solos de textura fina (Dirksen & Dasberg, 1993;

Jacobsen & Schjønning, 1993). Além disso, Dirksen & Dasberg (1993) encontraram diferenças significativas na estimativa da θ , usando a equação de Topp et al. (1980), para dois solos brasileiros, os quais atribuíram a diferença à presença de gibbsita.

Os resultados obtidos por Robinson et al. (1994) indicam que a mineralogia do solo pode ter forte influência nas calibrações da TDR, sendo observado que em um solo com 15 % de goetita ou 15 % de hematita, as estimativas da θ podem sofrer alterações utilizando a equação de Topp.

A relação do elevado teor de argila com grande área de superfície específica no solo incrementam as forças de absorção da água pelas partículas do solo, as quais restringem a liberdade rotacional das moléculas de água, que conseqüentemente reduzem os valores de K_a medido (Roth et al. 1990). Silva (1998) concluiu que a presença de óxido de ferro pode afetar o campo magnético criado pelo pulso elétrico, e, por conseguinte comprometer o tempo de deslocamento da onda eletromagnética emitida pelo TDR.

No Latossolo vermelho distroférico este fenômeno, normalmente, é explicado pelo aumento da água retida no solo promovido pelo óxido de ferro. Grohmann (1970) demonstrou que a superfície específica para este solo foi reduzida em 50 % após a remoção do óxido de ferro e da matéria orgânica. Ponizovsky et al. (1999) introduziu para este fenômeno o termo "bound water" (água confinada), designando, assim, o teor de água no solo que é afetado pelas forças oriundas do aumento da área de superfície específica.

Para resolver eventuais problemas causados por este fenômeno estudou-se uma maneira de calibrar adequadamente o equipamento de TDR, visando determinar uma equação capaz de dar confiabilidade às estimativas da θ dentro dos objetivos desejados. Sendo assim, determinou-se, a partir de um procedimento experimental, uma equação, a qual relaciona a θ e a K_a .

Esta equação foi comparada com três outras equações encontradas na literatura, entre elas a de Topp et al. (1980).

MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio foi conduzido no Laboratório de Hidráulica, Irrigação e Drenagem da Feagri/Unicamp. Aonde duas metodologias foram usadas para determinar a equação de calibração, na primeira metodologia, para condições de laboratório usando amostras

deformadas de solo e, na segunda, para condições de campo. As medidas de K_a foram realizadas utilizando um equipamento da TDR da marca Trase System I, juntamente com sondas contínuas de 3 hastes (200 mm de comprimento e 3 mm de diâmetro).

O tipo de solo empregado foi o Latossolo vermelho distroférico, caracterizado física e quimicamente na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo utilizado

Físicas											
Camada (m)	Densidade do solo (kg.m ⁻³)	Porosidade Total (%)	Textura (g/kg ⁻¹)								
			Argila	Silte	Areia						
0-0,25	1240	53,2	560	90	350						
Químicas											
Camada (m)	pH CaCl ₂	P ?g.cm ⁻³	M.O. (%)	F ₃ O ₂	H+Al	K	Ca	Mg	S	CTC	V (%)
0-0,25	5,7	120	3,9	21,3	2,8	0,4	7,9	2,0	10,3	13,1	79

Adaptada de Lucarelli, 1997

Para se efetuar a calibração em laboratório, utilizou-se o solo coletado do campo experimental, da camada de 0,0-0,20 m; posteriormente, o solo foi destorroado, secado ao ar e peneirado (peneira de 2 mm). Para efetuar as determinações de K_a e θ , seguiu-se o procedimento descrito por Tommaselli & Bacchi (2001). Nesta metodologia, as etapas de umedecimento, com adição de 100 mL de água por etapa, foram continuamente repetidas, até atingir umidades próximas à da saturação. O procedimento é explicado a seguir: metade da amostra de solo coletada, de cerca de 4 L, foi esparramada em uma mesa, formando uma fina camada de solo e, através de um pulverizador, adicionou-se cerca de metade da água desejada (50 mL); a seguir, a outra metade da amostra foi esparramada sobre a metade anterior, pulverizando-se com água até completar os 100 mL. O solo foi bem misturado e peneirado, de três a quatro vezes, em peneira de malha de 2 mm, obtendo-se sua homogeneização. Após o umedecimento e homogeneização, o solo foi colocado em um recipiente plástico, de cerca de 5 L de volume, compactado de modo a manter a sua densidade o mais uniforme possível. O recipiente com o solo foi pesado, o que permitia a obtenção do valor de densidade do solo úmido, valor este a ser utilizado na determinação da umidade do solo.

Em condições de campo, durante um período de 70 dias, fez-se as leituras da K_a a partir de 3 sondas de TDR instaladas na profundidade de 0 a 0,20 m e coletaram-se,

simultaneamente e ao redor das sondas, 5 amostras de solo para medição da θ pelo método gravimétrico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados médios da θ versus a K_a , apresentados na Tabela 2, pôde-se determinar uma equação representativa para as condições em estudo.

Tabela 2. Resultados obtidos em condições de laboratório e de campo

θ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	K_a	θ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	K_a
0,027	2,8	0,276	16,3
0,043	3,2	0,283	16,8
0,063	3,8	0,286	18,1
0,094	4,5	0,349	19,2
0,109	5,1	0,327	19,9
0,126	5,5	0,317	20,2
0,151	5,9	0,317	20,3
0,173	6,5	0,363	24,4
0,206	8,7	0,392	25,8
0,224	11,0	0,425	27,0
0,232	14,1	0,398	27,4
0,271	15,2	0,419	29,8

Os resultados em negrito foram obtidos em condições de laboratório

Observa-se que a calibração de um equipamento de TDR não é tarefa das mais fáceis, principalmente para os solos com teores elevados de argila. É importante destacar que a equação obtida em laboratório não explicou satisfatoriamente a variação da θ encontrada no campo, assim sendo, tornou-se inviável a sua utilização para estudo. Este comportamento ocorreu devido à metodologia não reproduzir a realidade encontrada em campo, deformando o solo e provocando compactação para θ superiores a $0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Em contrapartida, não foi possível obter valores de θ do solo em campo quando o mesmo apresentava valores abaixo de $0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Este efeito pode ser explicado pela quantidade de água absorvida pelas partículas do solo, o que se acentua com o incremento de óxido de ferro, matéria orgânica e argila. Este problema foi detectado por Tommaselli (1997), o qual observou que, sistematicamente, os menores valores de coeficiente de determinação de seus ajustes ocorreram em Latossolo Vermelho e Argissolo vermelho, obtendo-se 0,9516 e 0,9435 respectivamente. Este fenômeno provoca valores de K_a mais baixos quando comparados com K_a em água livre.

De frente a este problema, o que não possibilitou obter medidas confiáveis para calibração em pontos acima de $0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para leitura em laboratório e para pontos abaixo de valor para leitura em campo, propôs-se checar a possibilidade de junção dos pontos.

O modelo adotado foi o polinomial cúbico, pois se encontrou na literatura que o mesmo se mostra superior a todos os outros, apresentando os maiores valores de coeficiente de correlação para solos com textura fina. Tommaselli (1997) constatou que o termo cúbico da θ deixa de ser importante à medida que a textura do solo se torna mais grosseira. A partir dos dados da Tabela 4, encontrou-se a equação que relaciona a θ e a K_a : $\theta = -0,0603 + 0,0415K_a - 0,0017K_a^2 + 3 \times 10^{-5} K_a^3$, $r=0,98$.

Esta equação foi comparada com três outras equações encontradas na literatura, Topp et al. (1980), Silva (1998) e a equação determinada em laboratório (Souza et al., 1999), sendo mostradas na Figura 1. O erro médio, $\pm \sqrt{\sum (\text{ajustado}_i - \text{medido}_i)^2 / n}$, calculado para as equações foram $\pm 0,03$, $\pm 0,14$, $\pm 0,05$, $\pm 0,02$, respectivamente, Topp et al. (1980), Silva (1998), Souza et al. (1999) e Estimado. Em posse desses resultados pode-se concluir que a equações de Topp poderia ser utilizada para a condição de campo, pois se observou o maior erro concentrado nas medidas realizado em laboratório.

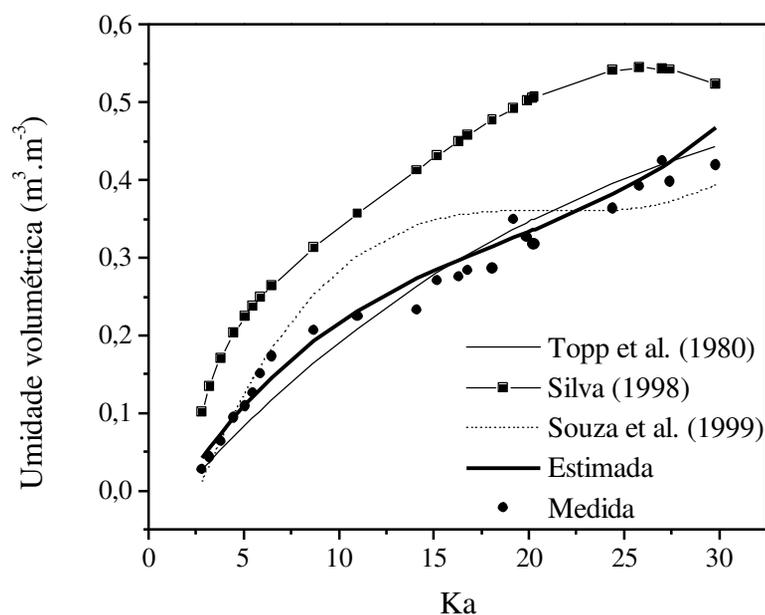


Figura 1. Comparação entre as diferentes equações de calibração

Para última análise, usou-se a equação de calibração obtida em um experimento no laboratório, no qual comparou-se os bulbos molhados estimados pela equação com os medidos

pelo método gravimétrico. Estes resultados são apresentados na Figura 2. Observa-se resultado satisfatório, porém, as isolinhas tendem a se afastarem para θ menores, o quais se encontram nas maiores profundidades. Acredita-se que isso seja, novamente, devido ao conteúdo de água absorvido pelas partículas do solo.

Aproveita-se este momento para recomendar que a calibração do equipamento da TDR seja realizada, preferencialmente, em condições de campo, devendo-se ponderar os efeitos da textura do solo, da densidade do solo e dos óxidos de ferro (caso estejam presentes).

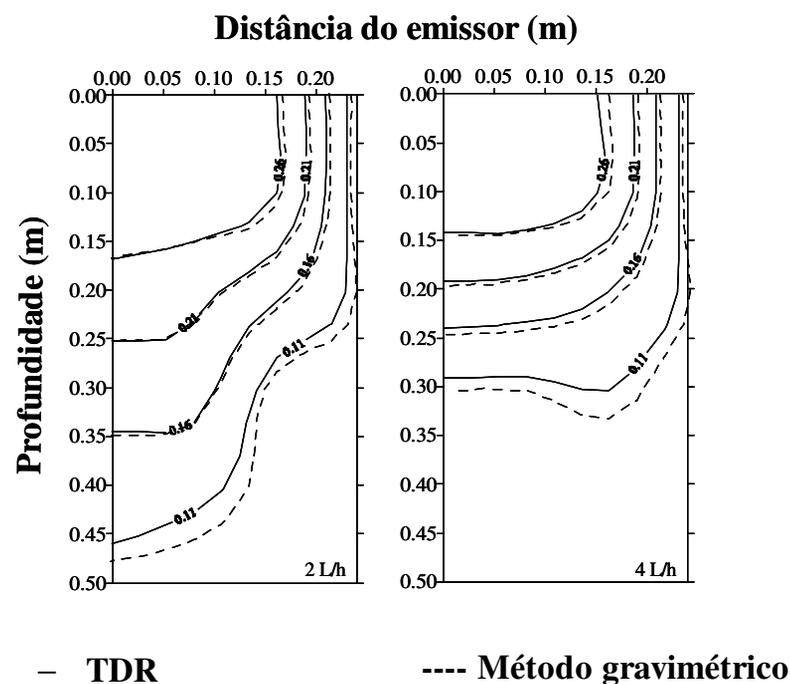


Figura 2. Comparação entre a θ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) medida pelo método gravimétrico e o estimado pela TDR

CONCLUSÕES

1. Não é recomendado o uso de uma metodologia de calibração baseada em amostras de solo deformada para o solo estudado.
2. A equação de calibração obtida explicou satisfatoriamente a variação da umidade do solo em laboratório.
3. A equação de calibração obtida não se diferenciou significativamente da equação de Topp.

LITERATURA CITADA

- Dirksen, C.; Dasberg, S. Improved calibration of Time Domain Reflectometry soil water content measurements, *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.57, p.660-667, 1993.
- Grohmann, F.A superfície específica e sua correlação com propriedades físicas e físico-químicas do solo. Piracicaba: ESALQ-USP, 1970. 52p. Tese de Doutorado
- Jacobsen, O.H. & Schj?nning, P. A laboratory calibration of Time Domain Reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.151, p.147-157, 1993.
- Lucarelli, J.R.F. Alterações em características de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de manejo. Campinas: Feagri-UNICAMP, 199. 86p. Dissertação de Mestrado
- Ponizovsky, A.A.; Chudinova, S.M.; Pachepsky, Y.A. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.218, p.35-43, 1999.
- Robinson, D.A.; Bell, J.P.; Batchelor, C.H. Influence of iron and titanium on water content determination by TDR, In: TDR symposium, 16, 1994, Foulom. Proceedings... Foulom, Denmark: Danish Institute for Plant and Soil Science, p.63-70, 1994.
- Roth, K.; Schulin, R.; Fluhler, H.; Attinger, W. Calibration of Time Domain Reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research*, Washington, v.26, p.2267-2273, 1990.
- Silva, E.L. Determinação automática de teor de água em Latossolo Roxo Distrófico com uso de reflectometria de onda. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. Resumos... Poços de Caldas: SBEA/UFLA, p.154-156, 1998.
- Souza, C.F.; Matsura, E.E.; Testezlaf, R., 1999, Calibração de um equipamento de TDR para um latossolo roxo utilizando sonda multihaste segmentada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27, 1999, Brasília. Anais... Brasília: SBSC/Embrapa, 1999. [CD ROM]

- Tommaselli, J.T.G. Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time Domain Reflectometry), Piracicaba: CENA/USP, 1997, 167 p.
Tese de Doutorado
- Tommaselli, J.T.G.; Bacchi, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.36, p.1145-1154, 2001.
- Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, Water Resources Research, Washington, v.16, p.574-582, 1980.

Publicação IV

**Multi-wire Time Domain Reflectometry (TDR) probe with electrical impedance
discontinuities for measuring water content distribution**

(Agricultural Water Management, submetido em agosto de 2001)

MULTI-WIRE TIME DOMAIN REFLECTOMETRY (TDR) PROBE WITH ELECTRICAL IMPEDANCE DISCONTINUITIES FOR MEASURING WATER CONTENT DISTRIBUTION¹

Claudinei Fonseca Souza² & Edson Eiji Matsura³

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Trabalho financiado pela Fapesp - 98/04931-7 e 13819-6

² Doutorando em Tecnologia de Irrigação, Feagri/UNICAMP, Departamento de Água e Solo, CP 6011, 13081-970, Campinas, SP. E-mail: cfsouza@agr.unicamp.br

³ Professor do Departamento de Água e Solo, Feagri/UNICAMP

ABSTRACT

The adequate estimation of water content distribution in wetted volume is fundamental in determining the number of drippers per plant and their location below the plant canopy in drip irrigation. Measurements of water content distribution are usually made by opening trenches, which is a time-consuming method and sometimes imprecise. Recent scientific developments have created the possibility of monitoring the soil moisture content using electronic sensors. The objective of this research was to develop and test two multi-wire TDR probes with electrical impedance discontinuities (referred to as the multi-wire probe) for sensing soil profile water content distribution. The experiment was divided in two parts. In part one, the laboratory performance of two multi-wire probe designs was studied and their reliability to monitor the water content variation in a porous media profile was evaluated. The second part was conducted in a 250 l bucket and the soil water content distribution, for an application depth of 15 mm, was evaluated by monitoring over 6 days at discharge rates of 2 and 4 l.h⁻¹. The results demonstrated the viability of using multi-wire probes to estimate soil water content distribution with different probe designs and to consistently obtain water content measurement in water dynamic processes. The following conclusion may drawn from the main results: (1) The measured characteristic impedance of the multi-wire probe for different designs was not the same as that geometrically calculated. This was due to the non-ideal probe geometry which provoked signal loss, thus, hindering peak impedance interpretation, mainly for probe 1 design. (2) The use of multi-wire probes in the TDR equipment showed a speedy determination of soil profile water content distribution using a single measurement.

Keywords: Time-domain reflectometry; Probe design; Wetted volume; Drip irrigation

SONDAS DE TDR MULTI-HASTE SEGMENTADAS PARA A ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

RESUMO

A estimativa adequada da forma e dimensões do bulbo molhado é de fundamental importância para a determinação do número de emissores por planta e da sua localização em relação à planta ou fileira de plantas. Para a medição do bulbo molhado é requerido o monitoramento da água no solo, que pode ser feito utilizando-se o método da trincheira. Este método é o mais usado para a determinação das dimensões do bulbo molhado, mas com certeza é o mais trabalhoso. A literatura atual relata uma tendência de utilização de sensores de umidade, principalmente o TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo). O objetivo desse trabalho é desenvolver e avaliar duas configurações de sondas de TDR multi-haste segmentada para estimar a variação de umidade em um perfil de solo. O trabalho foi dividido em duas partes, em que na primeira, as performances de duas configurações de sonda foram analisadas e, na segunda, estudou-se a possibilidade de determinar o bulbo molhado em irrigação por gotejamento, monitorando a evolução do bulbo molhado para vazões de 2 e 4 L.h⁻¹ foi realizado durante 6 dias aplicando-se 15 mm por meio de um gotejador em uma coluna de solo. Os resultados obtidos permitiram concluir a viabilidade do uso das sondas multi-haste segmentadas na estimativa da umidade de um perfil de solo e, também, consistência na obtenção de leituras durante o processo dinâmico da água no solo. As seguintes conclusões foram extraídas dos principais resultados: (1) As impedâncias características medidas para as diferentes configurações de sondas se diferenciaram dos valores calculados. Isso foi devido às sondas não possuíres geométricas ideais (célula coaxial), provocando perda do sinal eletromagnético e uma conseqüente dificuldade a interpretação dos picos de impedância no final da sonda. (2) A determinação da umidade distribuída em um perfil de solo usando sondas segmentadas mostrou-se ser rápidas, principalmente por realizar apenas uma leitura.

INTRODUCTION

Knowledge of wetted volume in the soil profile is important in optimizing drip irrigation management in agriculture. Drip irrigation is characterized by application of small amounts of water at high frequency and directly in the root zone. This type of application keeps the water content near to field capacity in a partly soil volume, commonly known as

wetted volume. The determination of the water content distribution in wetted volume is fundamental to determine the number of drippers per plant and its location under the plant canopy. Volume measurements are usually made by opening trenches where the water is applied. Another method is to monitor the soil moisture content by electronic means, such as specific sensors.

The TDR technique for measuring water content and electrical conductivity of the soil solution is becoming increasingly popular. Its outstanding advantages are accuracy, speed, reproducibility, good theoretical basis, a well-defined and selected sampled volume, and the fact that water content and salinity are measured in exactly the same volume (Topp et al., 1980; Coelho and Or, 1996). The method is based on the fact that the speed of propagation of microwave pulses in conducting cables inserted in the soil is very sensitive to its water content. This is the result of a large disparity between the dielectric permittivities of water ($\epsilon_w = 81$) and other soil constituents such as air ($\epsilon_a = 1$) and soil solid particles ($\epsilon_s = 3-5$) (Topp et al., 1980; Noborio, 2001). Consequently, measured bulk dielectric permittivity (ϵ_b) is dominated by the water phase. Soil ϵ_b is determined from travel time of a step electromagnetic pulse along a buried waveguide (TDR probe) (Topp et al., 1982b; Zegelin et al., 1989).

In TDR, the propagation velocity of a high-frequency electromagnetic signal is determined by:

$$v = c / \sqrt{\epsilon_b}$$

where v is the propagation velocity and c is the propagation velocity of electrical signals in vacuum or free space ($3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$). In the application of TDR to soil water measurement, a fast rise-time voltage pulse travels in the soil guided by a transmission line or wave guide of length, L , and the pulse reflects back from the end. By determining the travel time, t , of the pulse sent through the transmission line, it is possible to obtain the velocity during the two-way travel as $v = 2L/t$ (Topp et al., 1980; Dalton, 1984; Noborio, 2001; Souza et al., 2001a). Combining the two mathematical expressions, the apparent dielectric constant of the measured soil can be calculated by:

$$\epsilon_b = (ct / 2L)^2$$

The most recent research on the TDR technology shows a tendency in the direction of understanding the technique better and improving the probes' configuration.

There is considerable flexibility in probe design, which allows the measurement of water content. A wide variety of TDR probes or transmission lines have been developed and evaluated, both experimentally and theoretically. The initial TDR laboratory measurements were made in coaxial transmission lines (Topp et al., 1980). For field application, it was necessary to use a configuration that would allow us to monitor the exchange of the soil water content near the probe, which was not possible using a coaxial probe. The parallel-wire transmission line was adopted and used successfully in the field (Topp and Davis, 1985). Multi-wire soil probes, which emulate coaxial transmission lines, were designed (Zegelin et al., 1989). They observed that signals from the new probes allowed more reliable and accurate volumetric water content and dielectric constant measurements.

Hook et al. (1992) designed a probe for profiling soil water with depth using two metal strips mounted on a plastic core where shorting diodes defined the various segments along the probe. Redman and DeRyck (1994) measured the soil water content profile with depth using a probe comprised of a PVC access tube with two metal rods attached to its exterior. Another profiling probe was designed by Ferré et al. (1998) using two short rods mounted on two parallel access tubes. Small diameter wires led to the top of the measurement interval, limiting the sensitivity of the probe to the medium above the region of interest. Topp et al. (1982a) were successful at detecting the wetting front location during infiltration using TDR. A limitation of the procedure described by the authors was that it required a long probe to determine the reflection of electromagnetic waves from the wetting front and probes of this length are sometimes difficult to insert into soil.

The continuous-rod probes are comprised of two or three parallel metal rods completely surrounded by the medium to be measured, which when horizontally installed, are ideal to monitor the water content in a soil profile in the laboratory. However, the installation of horizontal continuous-rod probes in the field requires either excavation outside the domain of interest and long rods to avoid disturbing the medium of interest, or repacking of the soil around buried probes. These requirements make horizontal continuous-rod probes unsuitable for many field applications. Coelho and Or (1997) discussed aspects of wetted volume sensing as compared with point measurements and highlighted their importance for proper management and establishment of automatic irrigation threshold values under non-uniform

wetting conditions induced by drip irrigation. The objective of this study was to develop and test two multi-wire TDR probe designs for sensing soil profile water content distribution.

MATERIALS AND METHODS

Experiments were conducted in the Hydraulic, Irrigation and Drainage Laboratory of the Agricultural Engineering College (State University of Campinas/Unicamp). The experiment was divided in two parts. In the first one, the laboratory performance of two multi-wire probe designs was studied and the probes reliability to monitor the water content variation in a porous media profile was evaluated. The second part was conducted in a 250 l bucket and the soil water content distribution for an application depth of 15 mm was evaluated, by monitoring over 6 days under discharge rates of 2 and 4 l.h⁻¹. All measurements were made with a Trase System I (Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA) equipped with a multiplexer (Trase Multiplexer model 6020B5). The TDR signal analysis was done manually by equipment display. ϵ_b readings were monitored in the tests.

Performance of the multi-wire probes

The objective of this test was to evaluate, in the laboratory, the performance of two multi-wire probes with 0.10 and 0.20-m segmentations, denominated probe 1 and 2, respectively. The probes used were designed to monitor the soil water content profile using a series of rod diameter changes. Each change in the rod diameter causes an alteration in the impedance of the probe, resulting in a characteristic reflection on the waveform. The travel time between these reflections defines the water contents in the regions between each discontinuity.

The probes have four stems of 0.675 m in length. Probes 1 and 2 were divided into seven and four segments, respectively. In both probes, the reading of the last segment was not considered because probes with high impedances without a diode installed result in end reflections with small amplitudes, thus making it difficult to analyze the waveforms. The ends of the stems were designed with a sharp segment (0.075 m) to facilitate penetration into the soil. The probes have an expected reading depth of 0.60 m. The probe designs are shown in Figure 1 (Topp et al. 1982ab; Zegelin et al., 1989; Souza et al., 1999; Souza and Matura, 2002). The probes were manufactured in brass, except the intermediary spaces of smaller diameter, which were made of stainless steel.

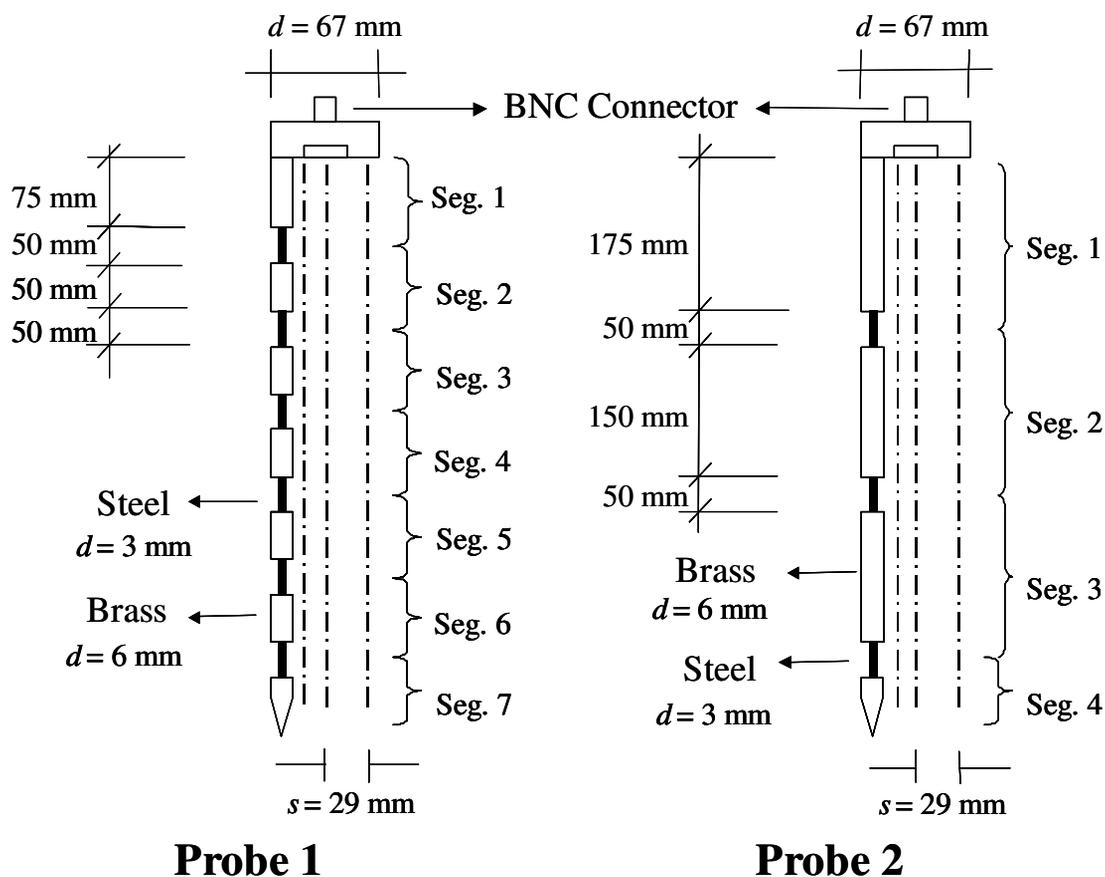


Figure 1. Schematic diagram of the Multi-wire probes 1 and 2

Electromagnetic performance of the multi-wire probes: The multi-wire probe characteristic impedance (z_0 [Ω]) was used to evaluate the electromagnetic performance of the probes and compare to an ideal coaxial design. The impedance of a transmission line is a function of its geometry (spacing and diameter of conductors) and the dielectric constant of the medium surrounding the probe. The difference in probe impedance is due to different diameters or rod spacings. So, different reflections in TDR waveforms can detect from the interfaces which different diameters or spacing of the rods are combined. Some combinations could result in probes with high impedance that, in turn give rise to final reflections with small amplitudes, thus making it difficult to analyze the waveforms. The characteristic impedance for an ideal coaxial transmission line is (Zegelin et al., 1989):

$$z_0 = 60 \ln(2s/d) \quad (1)$$

where ϵ_b is the dielectric constant of a material surrounding the transmission line, s and d are outer conductor radius and inner conductors diameter, respectively. Alternatively, z_0 can be

measured by determining the line's reflection coefficient ρ_{ref} when the line is filled with a uniform and dielectric material with dielectric constant ϵ_b (Zegelin et al., 1989):

$$z_0 = z_u \sqrt{\epsilon_{b,\text{ref}}} (1 + \rho_{\text{ref}} / 1 - \rho_{\text{ref}}) \quad (2)$$

$$\rho_{\text{ref}} = (v_1 / v_0) - 1 \quad (3)$$

where z_u is the load impedance ($\approx 50 \Omega$), v_1 is the voltage of the measured waveform in the medium, and v_0 is the initial voltage of the waveform prior to travel in the medium. We obtained estimates of z_0 for the multi-wire probe from two different designs (Figure 1) using equations (1) and (2). Also, we added to the evaluation, two standard three-wire TDR probes (SP1 and SP2) under the same conditions (distilled water at 20°C, $\epsilon=81$). The probes lengths were 0.10 and 0.20 m for SP1 and SP2, respectively. The probes were added to offer guidelines and reliability to the discussions of the results, once they are used in several experiments, which we assumed as ideal probes to estimate the soil water content.

Additionally, the shape and several characteristics of multi-wire probe waveforms were analyzed for electromagnetic performance.

Measurements of variation in soil water content: The evaluation was accomplished in thick sand; thereby the constructive effect of the probes was evaluated isolating the possible effects of the soil. The air-dried sand was packed in two plastic cylindrical boxes of 0.25 m in diameter and 0.90 m in length, with a bulk density of 1,650 kg.m⁻³. After the installation of the probes (probe 1 and 2), 1 l of water was applied on the surface of the sand by a dripper with four emission points (8 l.h⁻¹). The Topp calibration equation was used to calculate volumetric water content, θ (Topp et al., 1980). The variation in soil water content in the sand was monitored over as 8-h period.

Soil water content distribution measurements

In this study, we consider the possibility of using multi-wire TDR probes to estimated the water content distribution under drip irrigation. The evaluation was accomplished in a Dusky Red Latosol soil type. The air-dried soil was packed in two plastic cylindrical boxes of 0.60 m in diameter and 0.90 m in length. The soil had the following physical properties: initial water content (m³.m⁻³), total porosity (%) and bulk density (kg.m⁻³) of 0.10, 53 and 1,200, respectively. Into these boxes 10 multi-wire probes (similar for probe 2) were placed for soil

water content distribution measurements. The probe choice was based on the laboratory results that indicated the reliability of the probe configuration to describe the profile soil at a depth greater than 0.40 m. The 10 probes were distributed symmetrically in four directions with spacing of 0.08 m (Figure 2), starting from the emitter, which is placed in the center of the cylinder. The soil water content distribution for an application depth of 15 mm was evaluated, by monitoring over 6 days at a discharge rate of 2 and 4 l.h⁻¹.

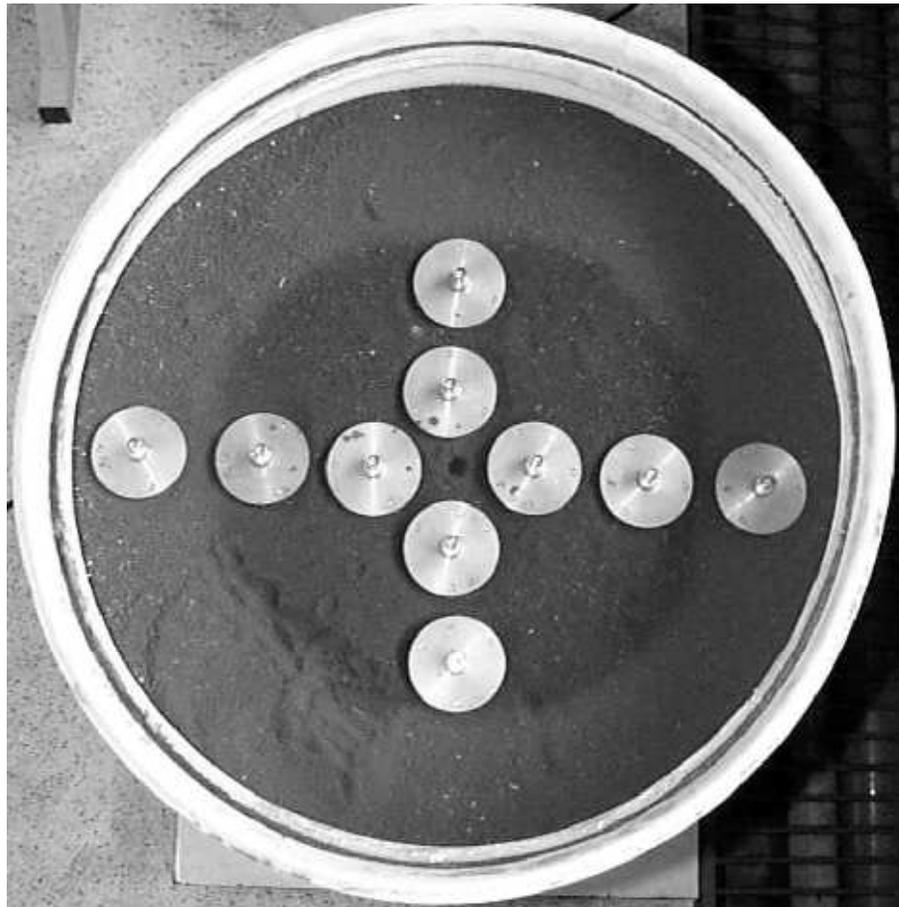


Figure 2. Symmetrical positioning of the multi-wire probes

The applied depth was divided into three irrigations with 2-day intervals. The evaporation effect was reduced using a plastic film on the box during the progress of the soil water content distribution. The calibration equation used was estimated and validated by Souza et al. (2001b) for field condition and is equal to $\theta = 3 \times 10^{-5} \epsilon_b^3 - 0.0017 \epsilon_b^2 + 0.0415 \epsilon_b - 0.0603$. Changes in the calibration equation were necessary because the Topp calibration equation did not fit for fine-textured mineral soils and clay. Dirksen and Dasberg (1993) have also found that two Brazilian ferralsols had

substantially different calibrations from that of Topp et al. (1980), which they attributed to the presence of gibbsite. The Dusky Red Latosol is included in this limitation.

RESULTS AND DISCUSSION

Performance of the multi-wire probes

Electromagnetic performance of the multi-wire probes: Table 1 shows a comparison between geometrically calculated (equation 1) and measured (equation 2) characteristic impedance for the different multi-wire probe designs. The reasons for the difference are not clear, however, we speculate that it may be due to the non-ideal probe geometry and also that high dielectric constant used for z_0 determination (distilled water) may have contributed to the deviation.

Table 1. Comparison of characteristic impedance of the probes

Probes	Dimension s/d , (mm)	z_0 , Ω	
		Geometric	Measured
Probe 1 (segment number)			
1	29/6	136	171
2	29/6	136	170
3	29/6	136	169
4	29/6	136	168
5	29/6	136	167
6	29/6	136	166
Probe 2 (segment number)			
1	29/6	136	168
2	29/6	136	167
3	29/6	136	166
Probe SP1	10/2.1	135	198
Probe SP2	14/3.1	132	196

The results show a decrease in characteristic impedance value (measured) between probes with increasing segment number. The increase in characteristic impedance may cause an increase in attenuation of the end reflection, thus making it difficult to analyze waveforms. Analyzing the results obtained by the equation (1), it can be observed that values calculated for multi-wire probes are close to values of the standard three-wire probes (SP1 and SP2). According to Zegelin et al. (1989), the multi-wire probes present lower values of measured impedance, but did not exceed 173Ω for continuous multi-wire probes, with 4,76 mm in diameter and 150 mm in length, values considered adequate. Thus, the probe impedance

values showed that the designed dimensions were appropriate to be used in soil-water monitoring.

Figure 3 shows the difference between the graph readings obtained for the two probes, and how difficult is to interpret peak impedance for probe 1 due to the reflection phenomenon. This phenomenon was caused by the interface between materials of different electric properties. Using equation (1), impedances of 136 and 177 Ω were found for the brass and stainless steel segments, respectively. According to Heimovaara (1993), the problem should be increased for dry and/or saline soils. Summarizing, the signal loss was caused by the rod design that has different material and geometry along its length.

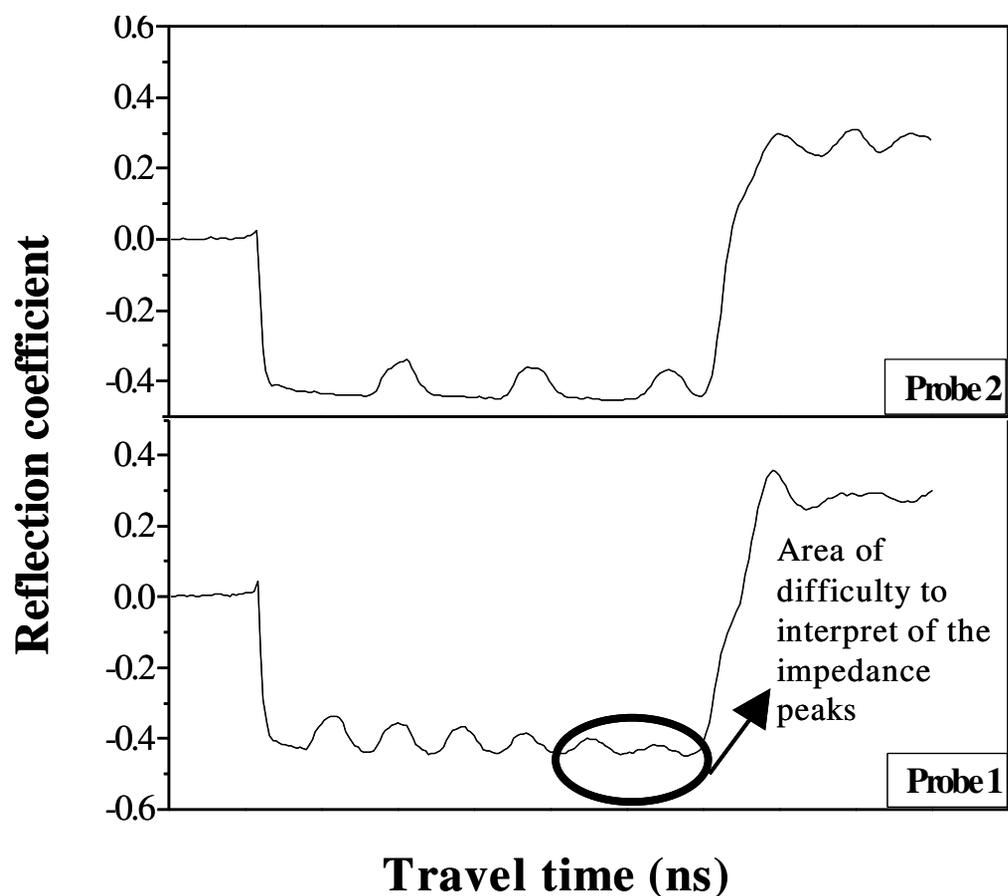


Figure 3. Comparison of travel time and signal readings for probes 1 and 2

Measurements of variation in soil water content: Table 2 summarizes measurements of soil profile water content distribution in tested porous media over an 8-h period. To obtain values of water content in the same depths for probes 1 and 2, the average of each depth was estimated by taking the average of the measured water content of segments 1-6 for probe 1. It was verified that there were no differences in water content readings between the different

probes, showing that both had similar characteristics in the electromagnetic waves propagation along the guide. However, probe 1 showed more difficulty in interpreting the impedance peaks in its extremities (Table 2) than probe 2. This behavior confirmed the previous observations, showing that the high number of segmentations considerably increased the reflections of the pulse. In agreement with these observations, Topp and Davis (1985) presented results showing the difficulty of waveform interpretation in probes with more than five segments.

Water content variations during water movement in the sand column profile were measured. For both probes, the highest water content ($0.26 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) occurred 20 min after the end of the infiltration process at the 0-0.20-m depth. After 1 h, water content was reduced quickly and, simultaneously, water movement was noticed for the next depth (0.20-0.40 m). After 3 h, an increase of water content of probe 2 was observed in the last depth (0.40-0.60 m). In spite of the limitations exhibited by probe 1, it offers greater detail of water content in the porous media profile, showing a variation at each 0.10 m.

Table 2. Comparison of volumetric water content ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) as a function of time and depth for probes 1 and 2

Time (h:m)	Depth					
	0 - 0.20 m		0.20 - 0.40 m		0.40 - 0.60 m	
	probe 1	probe 2	probe 1	probe 2	probe 1	probe 2
0:00	0.04	0.04	0.04	0.04	NE	0.04
0:10	0.14	0.13	0.04	0.04	NE	0.04
0:20	0.26	0.26	0.09	0.08	NE	0.04
0:30	0.21	0.21	0.17	0.17	NE	0.04
1:15	0.17	0.17	0.23	0.23	NE	0.04
3:10	0.14	0.14	0.20	0.20	NE	0.08
4:00	0.13	0.12	0.20	0.20	NE	0.10
5:00	0.13	0.12	0.18	0.18	NE	0.11
6:10	0.11	0.11	0.18	0.18	NE	0.12
8:00	0.11	0.11	0.18	0.18	NE	0.12

NE = Not estimated due to difficulty to interpret of the impedance peaks

Soil water content distribution measurements

The use of multi-wire probes in the TDR equipment showed a speedy determination of the soil water content in dynamic processes. This evaluation is based in acquisitions of the water content distribution in the wetted volume, which was at < 2-min intervals. This

characteristic was possibly due to the use of a multiplexer, which automates the acquisition of the water content readings.

For all treatments in our experimental conditions, a symmetry of the water movement was found between the x and y -axes. This symmetry permits the use of just two probes in the last observation circle (Figure 2). The wetting front did not reach the probes set 0.24 m from the emitter, making faster readings and producing a smaller amount of graphs for interpretation. The advantage of producing a small amount of graphs is interesting due to equipment memory limitation, it involved approximately 180 graphs. It was also observed that it is possible to use one quadrant to monitor the water content distribution in laboratory conditions, due to the soil homogeneity.

The soil profile water content distribution was monitored at 2-h intervals, but in Figure 4 the soil water content profiles 48 h after each irrigation are presented. It was possible to verify that doubling the rate from 2 to 4 $\text{l}\cdot\text{h}^{-1}$, a larger horizontal movement of water took place in the soil and, consequently, there was a decrease of the vertical movement. These results agree with the observations of Bresler et al. (1971) and Keller and Bliesner (1990). Also, we observed that the higher values for water content are concentrated near the emitter, confirming the results obtained by Botrel (1988) and Zanini (1991).

An expansion of the different axes (x , y) for successive irrigations was also verified. These results coincide with the tendency observed by Nogueira et al. (1999). The authors found an expansion of the wetted volume due to second and third irrigation in field conditions. The requirement to accomplish two or more successive irrigations to estimate the wetted front was confirmed, showing that initial conditions of the water content are essential for wetted volume determination. The results confirms our laboratory findings and show that multi-wire probe measurements are reliable and can be use for measurement of soil profile water content distribution.

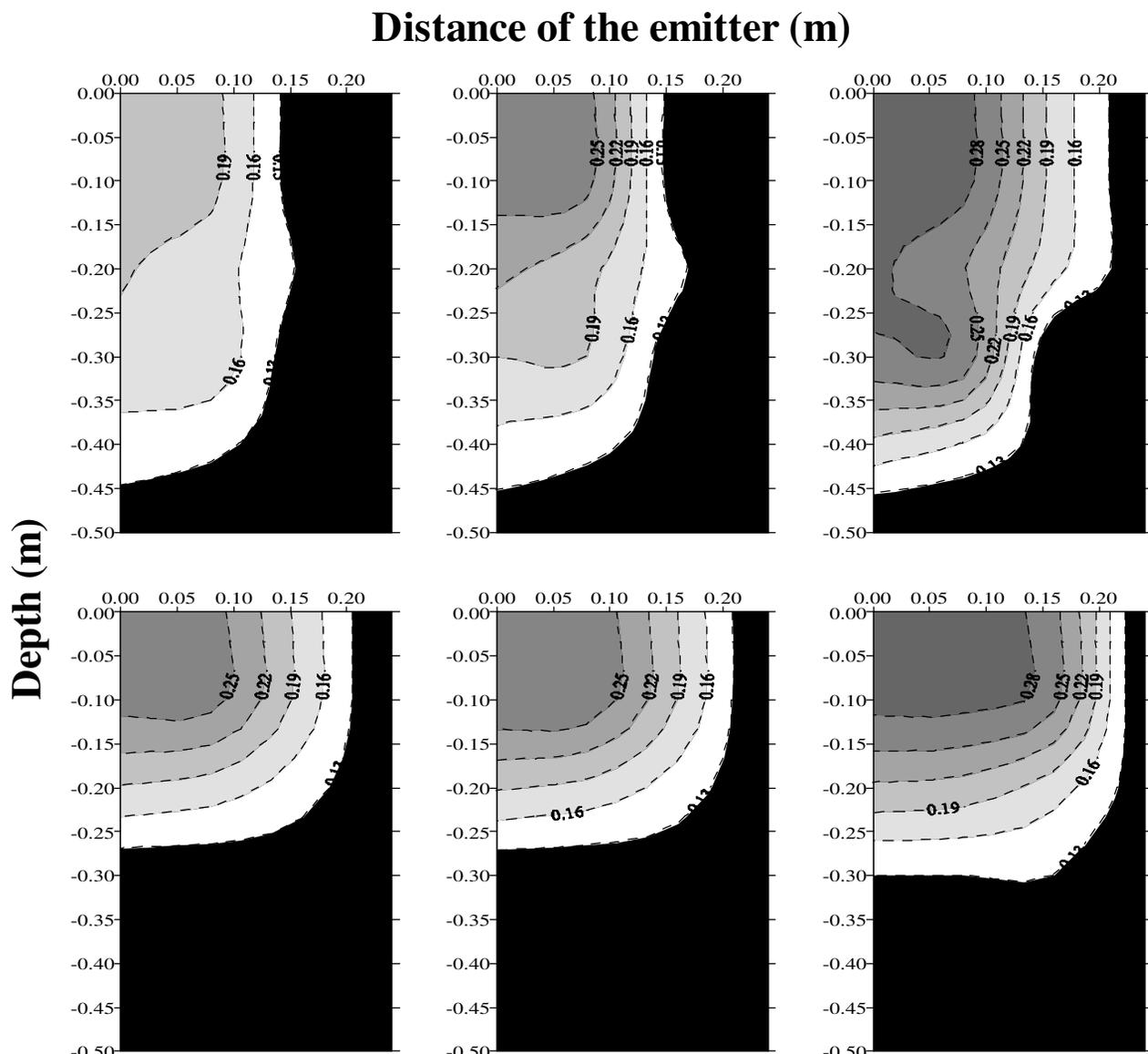


Figure 4. Evaluation of the soil water content distribution at drip irrigation rates of 2 and 4 l.h⁻¹

POTENTIAL APPLICATIONS OF THE MULTI-WIRE PROBE

We envision several potential applications for the proposed multi-wire probe, with the first stemming from the original motivation for the study, namely, the use of a probe to monitor water and solute mass in the soil profile using a single measurement. These lead to practical applications involving integration of soil water status in crop rooting zones, which receive non-uniform wetting as applied by drip irrigation. In addition these applications, the multi-wire probe offers capabilities for monitoring the dynamics of the soil water volume around a point-source by using probes with different numbers of segments to differentiate soil water conditions at different vertical and horizontal slices or soil volumes. This capability could be useful in a developing orchard with young trees (or vines) whose rooting volumes

evolve with time and require different amounts and volumes of water and fertilizer over time. Therefore, this knowledge of soil water content distribution is important for agriculture, mainly the determination of its variation in the soil profile to optimize irrigation management.

CONCLUSION

The results demonstrated the viability of using the multi-wire probes of two different designs with electrical impedance discontinuities to estimate the soil water content distribution and to consistently obtain the water content measurement in water dynamic processes in the laboratory. The following conclusion may be drawn from the results: (1) The measured characteristic impedance of the multi-wire probe of two different designs was not the same as the geometrically calculated impedance due to the non-ideal probe geometry, which provokes signal loss, thus, hindering peak impedance interpretation, mainly for probe 1 design. (2) The behavior of waveforms measured with the multi-wire probe were not the same for the two different designs used. (3) The use of multi-wire probes in the TDR equipment showed a speedy determination of soil profile water content distribution using a single measurement. All these conclusions suggest that future research on the evaluations of other probe configurations with smaller segments will help to detail the water content in the profile in order to decrease soil space variability.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) under contract numbers 98/04931-7 and 98/13819-6. We are grateful to Roberto Testezlaf (Unicamp – Brazil), Dani Or (Utah State University - USA) and Eugênio F. Coelho (CNPMPF – Embrapa - Brazil) for all discussion.

REFERENCES

- Botrel, T. A., 1988. *Simulação da distribuição espacial da água em solo irrigado com gotejador*, Piracicaba, Tese de Doutorado - ESALQ-USP. 61 p.
- Bresler, E., Heller, J., Diner, N., Bem Asher, J., Brandt, A., Goldberg, D., 1971. Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35, 683 – 689.

- Coelho, E.F.; Or, D., 1996. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. *Trans. ASAE* 39, 2007 – 2016.
- Coelho, E.F., and D. Or. 1997. Applicability of analytical solutions for flow from point sources to drip irrigation management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1331 – 1341.
- Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S., Rhodes, J.D., 1984. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* 224, 898 – 990.
- Dasberg, S., Bresler, E., 1985. *Drip irrigation manual*. Bet Dagan, Israel: International Irrigation Information Center. (Publications No. 9).
- Dirksen, C., Dasberg, S., 1993. Improved calibration of Time Domain Reflectometry soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 660 – 667.
- Ferré, P.A., Rudolph, D.L., Kachanoski, R.G., 1998. Water content response of a profiling time domain reflectometry probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 865 – 873.
- Heimovaara, T.J., 1993. Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 1410 – 1417.
- Hook, W.R., Livingston, N.J., Sun, Z.J., Hook, P.B., 1992. Remote diode shorting improves measurement of soil water by time domain reflectometry. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56, 1384 – 1391.
- Keller, J.; Bliesler, R.D., 1990. *Sprinkle and trickle irrigation*. New York: Van Nostrand Reinhold. 652 p.
- Noborio, K., 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Comput. Electron. Agric.* 31, 213 – 237.
- Nogueira, C.C.P., Coelho, E.C., Leão, M.C.S., 1999. Efeito da irrigação subsequente nas dimensões do bulbo molhado por gotejamento superficial e subsuperficial. In: Congresso Chileno de Ingenieria Agricola, 3, Chillán. *Anais...* Chillán: Universidad de Concepcion. 92 – 97.
- Redman, J.D., ReRyck, S.M., 1994. Monitoring nonaqueous phase liquids in the subsurface with multilevel time domain reflectometry probes. In: *Proceedings of the International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications*, Vol. 1, Evanston. Evanston: U. S. Bur. of Mines, Northwestern University.

- Souza, C.F., Matsura, E.E., Testezlaf, R., 1999. Desempenho de sondas multihaste segmentada para o monitoramento da umidade do solo por meio da técnica de TDR. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 28, Pelotas. *Anais...* Pelotas: SBEA/UFPel. [CD ROM]
- Souza, C.F., Matsura, E.E., Testezlaf, R., 2001a. Electromagnetic determination of water content: Measurements in multi-wire probes with electrical impedance discontinuities. In: IMOC 2001: Proceedings of the International Microwave and Optoelectronics Conference, Belém. Belém: SBMO/IEEE MTT-S. [CR ROM]
- Souza, C.F., Matsura, E.E., Testezlaf, R., 2001b. Application of the TDR technique in tropical soil. In: TDR 2001: Proceedings of the International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications, 2, Evanston. Evanston: Northwestern University. [CR ROM]
- Souza, C.F., Matsura, E.E., 2002. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentada para estimativa da umidade do solo. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.* 6, 63 – 68.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16, 574 – 582.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1982a. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 672 – 684.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1982b. Electromagnetic determination of soil water content using TDR. II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 678 – 684.
- Topp, G.C., Davis, J.L., 1985. Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): a field evaluation, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 19 – 24.
- Zanini, J.R., 1991. Distribuição de água e de ion K^+ no solo, aplicados por fertirrigação em gotejamento. *Irrig. Tecnol. Mod.* 45, 13 – 24.
- Zegelin, S.J., White, I., Jenkins, D.R., 1989. Improved fields probes for soil water content and electrical conductivity measurements using TDR. *Water Resour. Res.* 25, 2367 – 2376.

Publicação V

Infiltração e distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento

(Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, submetido em setembro de 2002)

INFILTRAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO SOLO PARA O DIMENSIONAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO¹

Claudinei F. Souza² & Edson E. Matsura³

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Trabalho financiado pela Fapesp - 98/04931-7 e 13819-6

² Doutorando em Tecnologia de Irrigação, Feagri/UNICAMP, Departamento de Água e Solo, CP 6011, 13081-970, Campinas, SP. E-mail: cfsouza@agr.unicamp.br

³ Professor do Departamento de Água e Solo, Feagri/UNICAMP

RESUMO

O objetivo principal do dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento é escolher adequadamente os componentes e o "layout" do sistema para promover a distribuição precisa da água (e fertilizante) para todas as plantas ao longo do campo. Visando este objetivo avaliaram-se as contribuições capazes de fornecerem elementos básicos para o dimensionamento da irrigação por gotejamento utilizando sondas de TDR. Assim, o estudo experimento foi dividido em duas partes. Na primeira, o efeito de irrigações sucessivas nas dimensões dos raios horizontal e vertical do bulbo molhado analisado em condições de laboratório; e na segunda, os processos de infiltração e de distribuição da água na formação do bulbo molhado em campo. Com os resultados apresentados nesta pesquisa pôde-se concluir, principalmente que: a umidade inicial do solo, o volume aplicado, a vazão do gotejador, o disco saturado e a condutividade hidráulica são elementos importantes e devem ser conhecidos para o dimensionamento e o manejo adequado da irrigação.

Palavras-chave: Bulbo molhado, relação água-solo, TDR.

SOIL WATER INFILTRATION AND DISTRIBUTION FOR DRIP IRRIGATION DESIGN

ABSTRACT

The major goal of a drip system design is to choose the appropriate components and layout to obtain adequate distribution of water (and fertilizer) throughout the field. Following this objective it was evaluated the contributions which supply the basic elements for the drip irrigation design using TDR probes. Thus, the experiment was divided in to two parts. In the first one, the effect of successive irrigations in the wetted volume horizontal and vertical

dimensions analyzed in laboratory conditions; and in the second one, the water infiltration and distribution processes in the formation of the wetted volume in field. Based on the results it was mainly conclude: the soil initial water content, the applied volume, the discharge rate, the saturated disk and the hydraulic conductivity are important elements and they must be known for an appropriate irrigation design and management.

Key words: Wetted volume, water-soil relationship, TDR.

INTRODUÇÃO

Segundo Dasberg & Bresler (1985), Azevedo (1986) e Dasberg & Or (1999), a irrigação por gotejamento compreende na aplicação de pequenas quantidades de água diretamente na zona radicular das plantas através de fonte pontual ou linha de gotejadores sobre ou abaixo do solo, com pressões de operação variando entre 20-200 kPa e baixa vazão (1-30 L.h⁻¹). Esta aplicação resulta em um volume de solo molhado, conhecido como bulbo molhado.

A irrigação por gotejamento ocupa uma significativa porção das áreas irrigadas no mundo e está em crescimento. Mas, somente em áreas específicas e para culturas economicamente rentáveis. A razão para esta limitação é econômica, pois o método possui alto custo de equipamentos, instalação e manutenção (Dasberg & Or, 1999).

Comparada com outros métodos de irrigação (Randall & Salvatore, 1988; Assaf et al., 1989; Shrivastava et al., 1994), o gotejamento possui várias vantagens, destacando-se o aumento da produtividade e a conservação da água. Para essa última, Wu & Gitlin (1975) concluem que uma eficiência de aplicação de 90 % pode ser facilmente alcançada. Este cálculo assume que a variação da vazão entre gotejadores não excede 20 %, o qual é um critério conservador de acordo com Solomon & Keller (1978) e Dasberg & Or (1999). Porém, Randall & Salvatore (1988), Assaf et al. (1989) e Shrivastava et al. (1994) destacam uma desvantagem não diretamente econômica que é a falta de conhecimento dos processos que envolvem a infiltração e a distribuição da água no solo.

A variação espacial das propriedades físicas do solo adiciona variações na infiltração e na distribuição da água aplicada pelos gotejadores. Estas variações no volume de solo molhado são um problema à estimativa adequada do número de gotejadores por planta e de sua localização em relação às plantas ou fileiras de plantas (Clothier et al., 1985; Or, 1996).

Além disso, perdas por percolação decrescem a eficiência do sistema de irrigação (Bouwer, 2000). Assim sendo, o sucesso de um sistema de irrigação por gotejamento será possível se existir um entendimento dos processos da infiltração e da distribuição da água no solo. A compreensão inadequada destes processos associa-se, no Brasil, ao uso incorreto desta técnica, na maioria das vezes devido à utilização de informações empíricas, retirados da literatura e apresentados na forma de tabelas e fórmulas.

Informações empíricas associadas ao dimensionamento da irrigação, geralmente, são baseadas em estudos conduzidos para uma determinada proposta, que não contribuem significativamente com informações que possam ser usadas nas melhores decisões possíveis, dentro de todas as condições de incerteza. Vários estudos com este propósito podem ser encontrados na literatura (Wooding, 1968; Brandt et al. 1971; Raats, 1971; Philip, 1971; Ben-Asher et al., 1978; Clothier & Scotter, 1982; Clothier, 1984; Or, 1995; Ould Mohamed El-Hafedh et al. 2001). Entretanto, informações direcionadas que respeitem, principalmente, as propriedades físicas do solo, podem ser extremamente úteis no dimensionamento do projeto e no manejo de irrigação, possibilitando a determinação de critérios de projeto como área molhada pelo gotejador, dimensões do bulbo molhado, eficiência dos sistemas, e posicionamento de sensores de umidade e de potencial.

Para promover uma contribuição capaz de fornecer elementos básicos para o dimensionamento da irrigação por gotejamento, estudou-se duas vazões de gotejadores em função das propriedades físicas do solo, avaliando-se os efeitos na relação água-solo durante os processos da infiltração e da distribuição de água.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em duas partes. Na primeira, o efeito de irrigações sucessivas nas dimensões dos raios horizontal e vertical do bulbo molhado analisado em condições de laboratório; e na segunda, os processos de infiltração e de distribuição da água na formação do bulbo molhado em campo. Desta forma, por meio de ambas as partes, avaliou-se contribuições capazes de fornecerem elementos básicos para o dimensionamento da irrigação por gotejamento.

O solo utilizado foi um Latossolo vermelho distroférico, existente no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP – SP. As principais características físicas deste solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas do solo utilizado

Camada (m)	Densidade do Solo (kg.m ⁻³)	Porosidade total (%)	Textura (g. kg ⁻¹)			CC m ³ .m ⁻³	PMP	Ks m.h ⁻¹
			Argila	Silte	Areia			
0,0-0,2	1306	51,0	580	170	250	0,40	0,27	0,032
0,2-0,4	1361	49,0	590	170	240	0,39	0,26	0,031
0,4-0,6	1283	52,0	640	140	220	0,43	0,29	0,033
0,6-0,8	1288	51,0	660	130	210	0,43	0,29	0,032

CC - Capacidade de Campo; PMP - Ponto de murcha permanente; Ks - Condutividade Hidráulica Saturada

A estimativa da variação da umidade do solo, no bulbo molhado, foi realizada com o auxílio de sondas de TDR multi-haste, com segmentos de 0,20 m, promovendo um perfil útil para leitura de até 0,80 m. Um testador de cabo Tektronix 1502 C (Tektronix, Inc., Beaverton, Oregon) equipado com uma interface RS 232 analisou o sinal eletromagnético das sondas, automaticamente, pelo programa WinTDR99 (Soil Physics Group – Utah State University). A forma construtiva da sonda e funcional do equipamento de TDR são descritos por Souza & Matsura (2002).

Os bulbos molhados foram formados no solo a partir da aplicação de água através de gotejadores com vazões de 2 L.h⁻¹ ($Q=2,2H^{0,34}$) e 4 L.h⁻¹ ($Q=4,6H^{0,53}$), onde H é a pressão (m). Para o volume de água aplicado, assumiu-se a lâmina de 5 mm de evapotranspiração potencial para o dimensionamento (ETd) de um sistema de irrigação, por ser uma ETd média representativa para o Estado de São Paulo. Os detalhes sobre a montagem e condução de cada parte experimental são apresentados, separadamente, a seguir:

Avaliação do efeito de irrigações sucessivas em laboratório

Com o intuito de estudar e conhecer o efeito de irrigações sucessivas nas dimensões dos raios horizontal e vertical do bulbo molhado aplicou-se a seguinte metodologia: o solo coletado no campo experimental foi destorroado, secado ao ar e peneirado (peneira de 2 mm) e, posteriormente, acondicionado em duas colunas de PVC (0,90 de comprimento e 0,60 m de diâmetro). E em cada coluna foram instaladas sondas de TDR multi-haste segmentadas. As 10 sondas foram distribuídas simetricamente em quatro direções com espaçamentos de 0,08 m

(Figura 1), a partir do gotejador, colocado no centro da coluna. Desta maneira, pode-se observar a evolução do bulbo molhado, durante e após 3 irrigações, no intervalo de 2 dias.

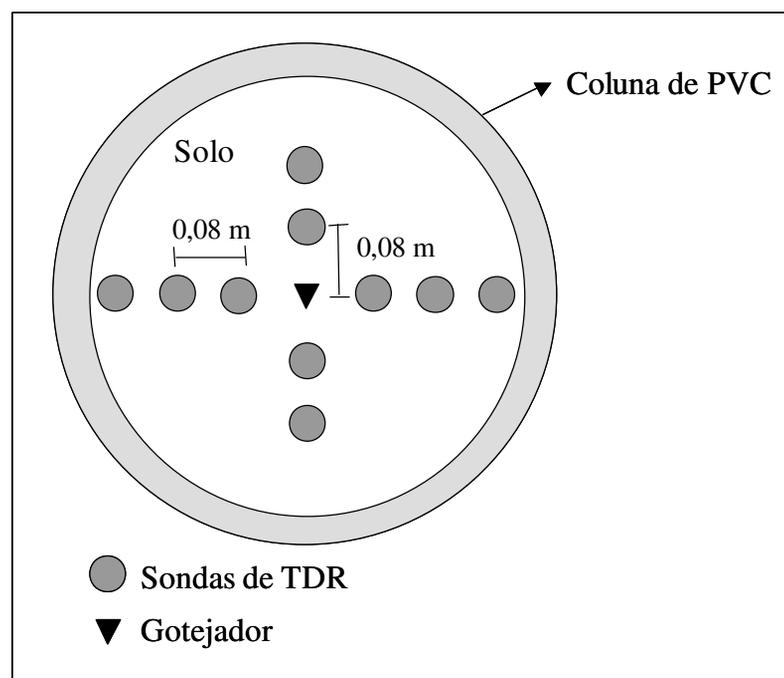


Figura 1. Disposição simétrica das sondas de TDR multi-haste segmentadas na coluna de PVC

Caracterização da infiltração e da distribuição da água no solo em campo

O experimento foi conduzido em uma área de 100 m², sem cultura instalada, no período de agosto a novembro de 2001.

Dez sondas multi-haste segmentadas foram usadas para estudar a infiltração e a distribuição da água na formação do bulbo molhado, respectivamente, para as condições experimentais sem e com sobreposição de bulbos.

Ensaio sem sobreposição de bulbos: Em uma área experimental de 1 m², as sondas foram instaladas em duas direções com espaçamentos de 0,10 m, a partir do gotejador. Este procedimento foi repetido em duas áreas próximas, nas quais o efeito da declividade natural do solo na simetria da distribuição da água foi considerado; instalando-se sondas na disposição vertical e horizontal em relação ao declive do terreno (Figura 2). Após a instalação das sondas, aplicou-se o volume de água desejado sobre a superfície do solo.

A metodologia descrita acima foi utilizada separadamente para as vazões desejadas. E o monitoramento da infiltração e distribuição da água dentro do bulbo molhado foi realizado em diferentes intervalos de tempo: antes da aplicação, após a infiltração, um dia após a

infiltração e dois dias após a infiltração. Para reduzir o efeito da evaporação da água aplicada, cobriu-se a área experimental com uma lona plástica.

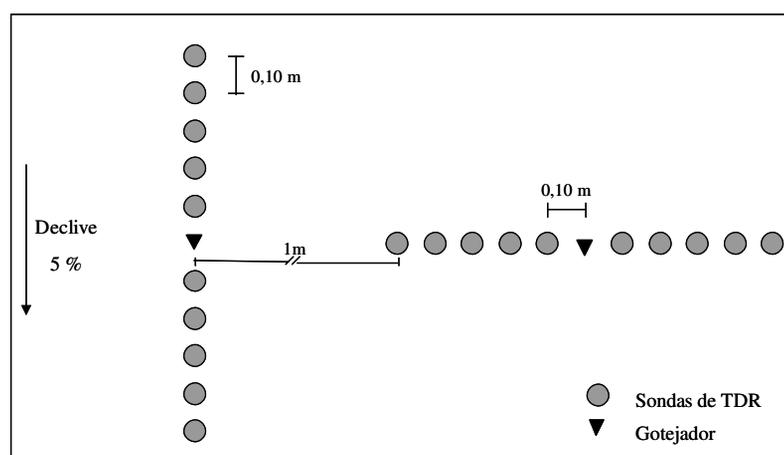


Figura 2. Esquema de montagem do ensaio em campo (a favor e contra o declive), sem sobreposição

O disco saturado (poça d'água, que permanece sobre o solo durante o processo de infiltração) e o avanço da frente de umedecimento na superfície do solo foram, também, acompanhados, utilizando-se uma régua milimetrada. No final de 2 dias após a infiltração, a distribuição da água dentro do bulbo molhado foi medido através do método gravimétrico, promovendo uma comparação entre as diferentes técnicas.

Os valores médios das mensurações realizadas nas diferentes disposições de sondas foram considerados como resultados de um só bulbo molhado.

Ensaio com sobreposição de bulbos: Utilizou-se, neste ensaio, um gotejador semelhante ao usado, anteriormente, para aplicar 4 L.h^{-1} . Fez-se esta opção pelo fato dos resultados do ensaio sem sobreposição indicarem ser o uso deste viável para se estudar a sobreposição de bulbos molhados, devido ao maior movimento horizontal da água quando comparado à condição de 2 L.h^{-1} .

Para a montagem do ensaio, as sondas foram distribuídas em uma linha, na qual foram posicionados 2 gotejadores espaçados em 0,50 m. Conforme é ilustrado na Figura 3. Após a montagem do ensaio aplicou-se um volume diário de 5 L de água sobre a superfície do solo, durante 5 dias. O volume aplicado foi dividido em duas partes iguais, ou seja, 2,5 L por gotejador.

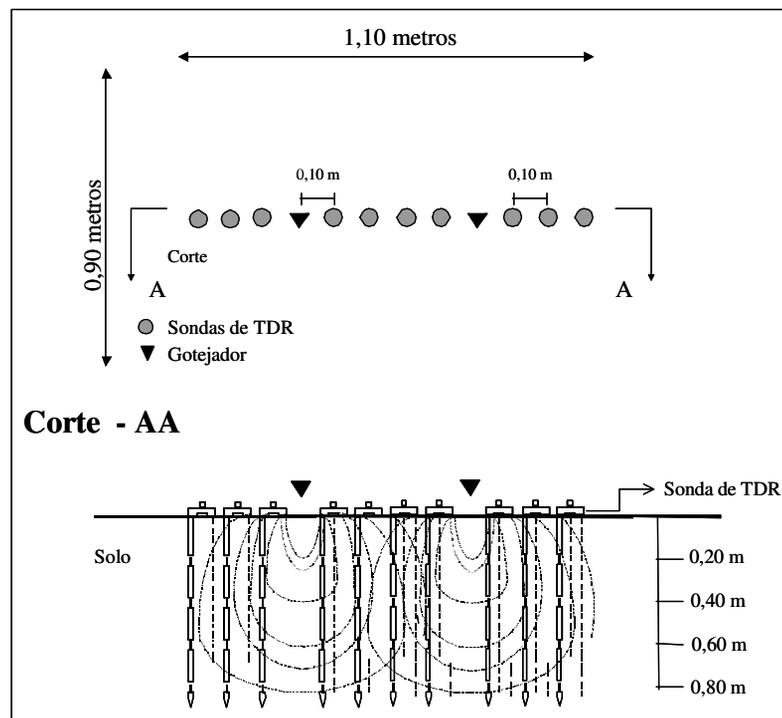


Figura 3. Esquema de montagem do ensaio em campo, com sobreposição

O monitoramento da dinâmica da água no solo foi realizado em diferentes intervalos de tempo: antes da aplicação, após a infiltração e um dia após a infiltração. E com o propósito de comparar o efeito da sobreposição, o procedimento de aplicação e o monitoramento da dinâmica da água foram repetidos para um outro ensaio para a condição sem sobreposição. Complementando esse procedimento, assumiu-se o volume central dentro dos diferentes ensaios em um volume de controle (0,50 x 0,50 x 0,40 m, respectivamente, comprimento, largura e profundidade). A área escolhida é semelhante à área entre os gotejadores do ensaio com sobreposição, desta maneira, a comparação foi direcionada para uma área comum de ação dos gotejadores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação do efeito de irrigações sucessivas em laboratório

A frente de molhamento é importante na aplicação da água em irrigação por gotejamento porque indica os limites do volume de solo molhado. A Figura 4 apresenta a localização da frente de molhamento considerando o efeito de irrigações sucessivas nas dimensões dos raios horizontal e vertical do bulbo molhado, em função de duas vazões de gotejadores para condições semelhantes de propriedades físicas do solo. Os resultados apresentados demonstram que a vazão dos gotejadores e as propriedades físicas do solo

exercem um efeito diferenciado na forma do bulbo molhado. Aumentando a vazão do gotejador, observou-se um aumento no raio horizontal e diminuindo a vazão ocorre acréscimo no raio vertical do bulbo molhado, devido à alteração da área de infiltração da água aplicada. Estes resultados estão em concordância com experimentos realizados por Bresler et al. (1971), Bresler (1978), Schwartzman & Zur (1986) e Keller & Bliesner (1990), nos quais concluem que um aumento na vazão do gotejador resulta em um acréscimo no movimento horizontal e uma menor expansão no movimento vertical da água no bulbo, para um mesmo tipo de solo e volume de água aplicado.

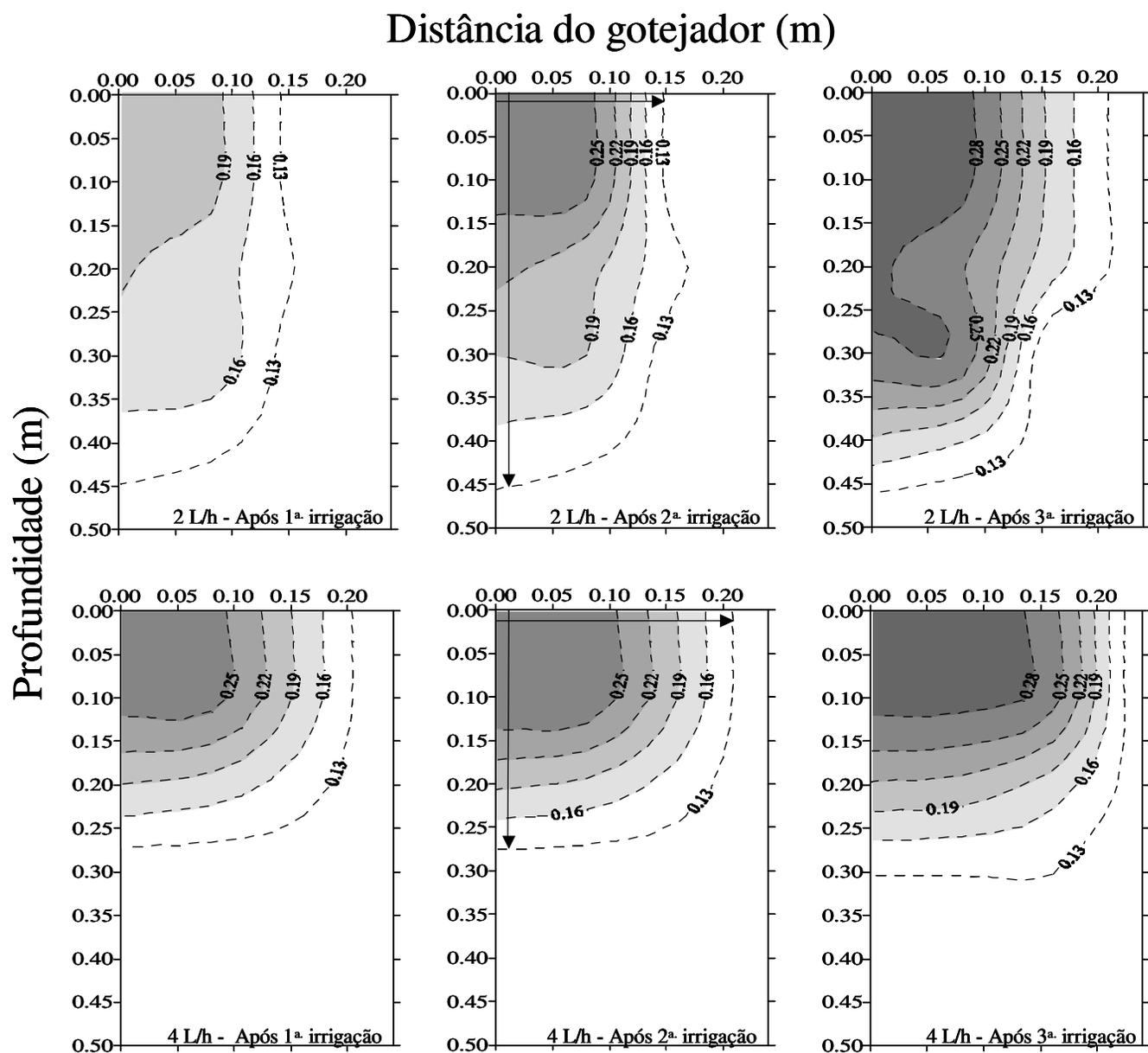


Figura 4. Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) para as vazões de 2 e 4 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ ao final de 48 h de cada irrigação, para condições de laboratório

Verificou-se também, um incremento no movimento da água nos raios horizontais e verticais devido ao efeito de irrigações sucessivas, resultados que coincidem com os encontrados por Nogueira et al. (1999), os quais encontraram um aumento do volume de solo molhado devido a segunda e a terceira irrigação, em condição de campo. Corroborando com este fato, Keller & Bliesner (1990) ressaltam a necessidade da realização de duas ou três irrigações sucessivas para dimensionar o bulbo molhado.

Para a discussão dos resultados, assumiu-se que o movimento da água foi determinado pela somatória dos potenciais da solução do solo, explorando basicamente, o potencial mátrico e o gravitacional. Geralmente, estes potenciais não exercem forças em igualdade, sendo esta diferença a responsável pela predominância, ou não, do movimento vertical e/ou horizontal da água no solo. Durante a primeira irrigação, para ambas as vazões, teve-se um movimento, muito intenso, da água devido a grande diferença do potencial total de água no solo, o que incrementou importância ao potencial mátrico. Na condição de maior vazão ($4L.h^{-1}$) o fluxo da água superou, rapidamente, a velocidade de infiltração e promoveu um aumento do disco saturado, o que foi suficiente para aumentar o raio horizontal do bulbo molhado. No ensaio de menor vazão de gotejador, o potencial gravitacional exerceu maior importância para a formação do bulbo molhado devido ao menor raio do disco saturado.

Caracterização da infiltração e da distribuição da água no solo em campo

Ensaio sem sobreposição de bulbos: Para as condições estudadas, observou-se ótima simetria no movimento da água nos diferentes eixos estudados (vertical e horizontal). Este efeito ocorreu devido ao posicionamento das parcelas serem próximas e contíguas, com propriedades físicas similares. Têm-se, na Figura 5, os perfis de umidade do solo para as diferentes vazões, em quatro diferentes intervalos de monitoramento. Nesta figura, verifica-se uma maior evolução do movimento da água na direção horizontal quando dobramos a vazão do gotejador, não se observando uma maior expansão na direção vertical para a menor vazão de gotejador. Esta última observação foi muito evidente nos resultados de laboratório, sendo agora justificada pela diferença entre as condições iniciais de umidade do solo. Para a condição de campo, nota-se uma estratificação da umidade no perfil do solo, no qual percebe-se maiores valores de umidade. Deste modo, a estratificação diferenciada alterou a condutividade hidráulica, evidenciando-se, o efeito desta no movimento da água no solo para

as 2 vazões de gotejadores em estudo e, confirmando a importância da umidade inicial do solo para o dimensionamento adequado da irrigação por gotejamento. Além disso, deve-se considerar as diferenças de estrutura do solo, onde no laboratório utilizou-se o solo deformado e no campo o solo é indeformado.

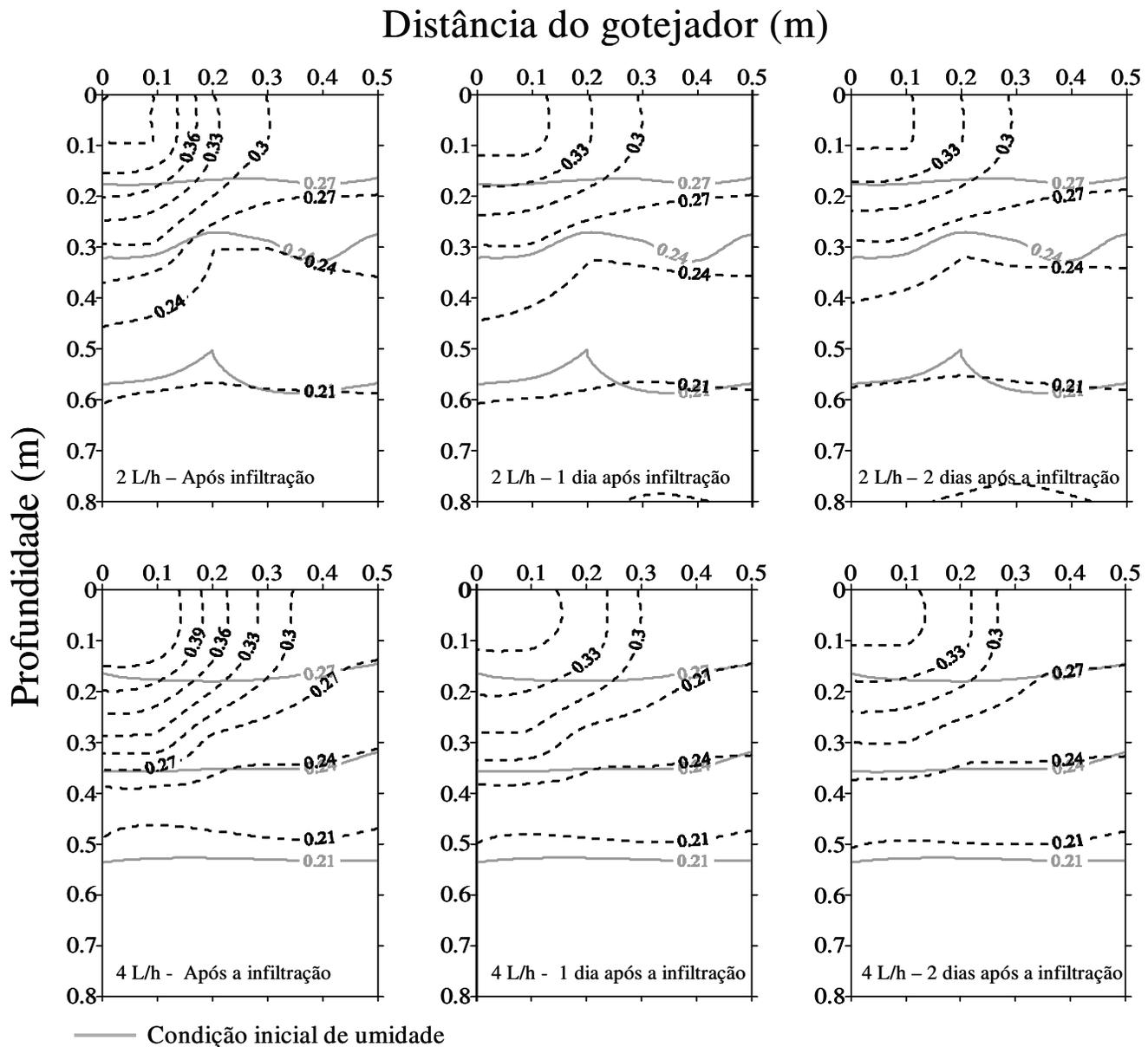


Figura 5. Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) para as vazões de 2 e 4 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ em função do tempo, para condições de campo

Ainda na Figura 5, os perfis de umidade do solo estimados logo após a infiltração evidencia a mudança crescente da frente de molhamento em relação à condição inicial do ensaio. E mostra que a grande evolução desta frente, nos dois dias monitorados, está concentrada durante o processo de infiltração. Desta forma, os resultados observados são de interesse prático no dimensionamento de sistemas de irrigação por gotejamento, especialmente

quando o período de redistribuição da água é menor que a infiltração, possibilitando controlar o volume de solo molhado com a combinação da vazão do gotejador de acordo com as propriedades físicas do solo.

Outra observação importante foi na estimativa do armazenamento da água (L) nos diferentes ensaios e nos diferentes intervalos de monitoramento. Utilizando-se sondas com segmentos de 0,20 m obteve-se bons resultados na diferença do volume de água aplicado e estimado, subestimando em média 0,20 L (4 %). O mesmo pode-se dizer da diferença média entre o armazenamento estimado pelo TDR e o medido pelo gravimétrico, sendo inferior em 0,36 L (0,25 %).

Alguns problemas foram observados durante os ensaios preliminares, como: os cabeçotes das sondas provocaram uma alteração na forma do disco saturado, confinando e alterando a formação do bulbo molhado. Para diminuir este problema, utilizou-se um espaçamento maior entre as sondas e o emissor (0,10 m) e assumiu-se que a umidade a 0,10 m no eixo horizontal é igual no eixo central, conforme é descrito no material e métodos. Acredita-se que esta diferença de posicionamento de sonda contribuiu com o erro entre o volume aplicado e o estimado, uma vez que, a maior umidade foi encontrada próxima à fonte pontual do emissor. O disco saturado alcançou 0,07 m de raio no ensaio de 2 L.h⁻¹ e o confinado (para espaçamento de 0,08 m entre as sondas e o gotejador) tinha 0,03 m. Para 4 L.h⁻¹, o disco confinado teve 0,04 m, e com o cabeçote afastado foi de 0,13 m.

Neste mesmo ensaio foi possível identificar a distribuição da água no perfil de solo estudado (Tabela 2). Observou-se, para ambas as vazões, que o maior armazenamento ocorreu na camada de 0,0-0,20 m durante todo o intervalo de monitoramento e, em média, 55 e 84 % da água aplicada foi distribuídas nesta camada e 34 e 16 % na camada de 0,20-0,40 m, respectivamente para as vazões 2 e 4 L.h⁻¹. Monitorou-se o movimento da água para a terceira camada (0,40-0,60 m) apenas para a vazão 2 L.h⁻¹ e, em nenhuma das condições de vazão a água atingiu a última camada (0,60-0,80 m). Estes resultados confirmam as observações anteriores sobre a importância da escolha da vazão do gotejador em relação ao volume pretendido de solo molhado e, também demonstram haver uma relação entre a vazão do gotejador e a distribuição da água dentro do bulbo molhado, no qual aumentando a vazão do gotejador a distribuição da água foi maior na superfície do solo e diminuindo a vazão observa-se uma distribuição que atinge uma maior profundidade.

Tabela 2. Volume de água (L) estimado para o perfil de distribuição da água no solo sob gotejamento, com vazões de 2 e 4 L.h⁻¹, nos diferentes intervalos de monitoramento

Intervalos	Volume total estimado (L)	Distribuição da água (L)			
		Camada (m)			
		0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8
2 L.h⁻¹					
Após a infiltração	4,82	2,92	1,37	0,53	0
5 h após a infil	4,20	2,07	1,64	0,49	0
1 dia após a infil	3,99	2,15	1,45	0,39	0
2 dias após a infil	3,33	1,90	1,18	0,25	0
4 L.h⁻¹					
Após a infiltração	4,77	4,00	0,77	0	0
5 h após a infil	3,92	3,07	0,85	0	0
1 dia após a infil	2,76	2,25	0,51	0	0
2 dias após a infil	1,90	1,77	0,13	0	0

Ensaio com sobreposição de bulbos: O ensaio objetivando estudar o efeito da sobreposição tem resultados interessantes, referentes à distribuição da água no solo.

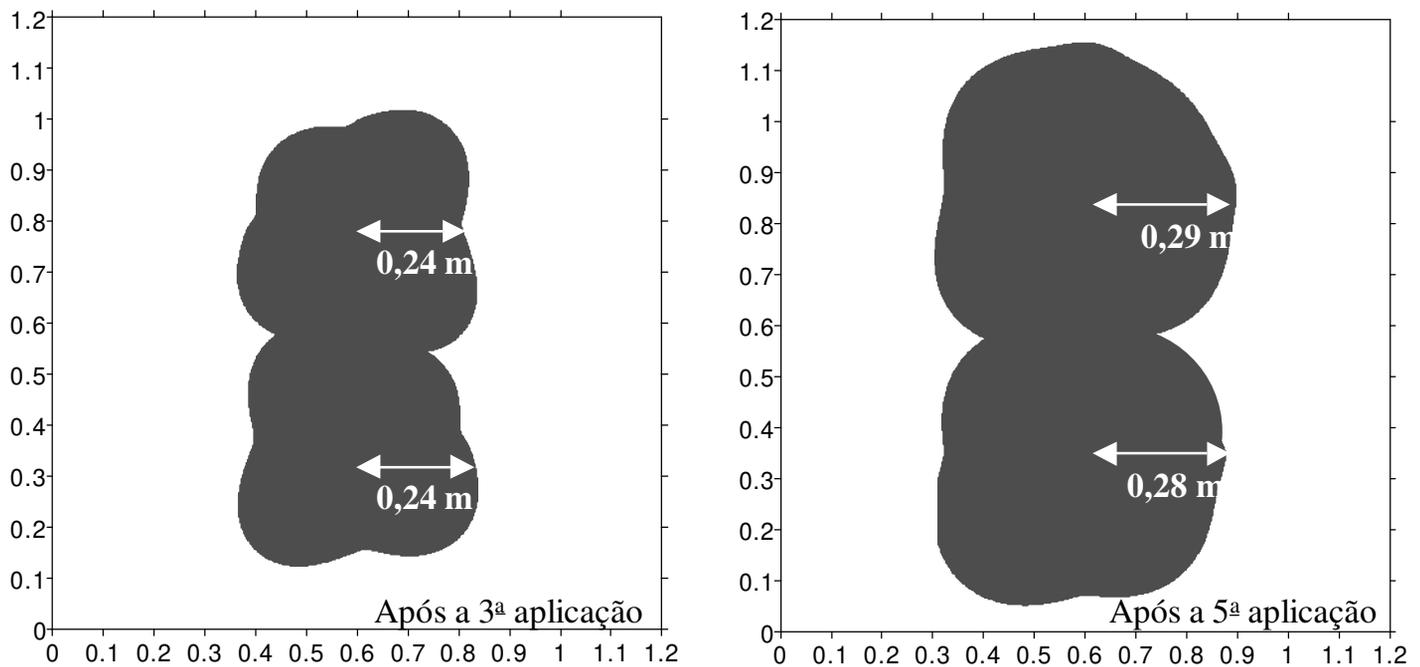
A forma em que a água foi aplicada, dividindo o volume desejado e promovendo a sobreposição de bulbos, apontou possibilidades dentro do manejo da irrigação em relação ao volume de solo molhado. As variações observadas na distribuição da água apontaram possibilidades em alterar a área superficial molhada, melhorar a uniformidade de distribuição da água e rebaixar a frente de molhamento.

A partir de estimativas da umidade na superfície do solo, verificou-se uma menor expansão do raio horizontal com a divisão do volume de água aplicado. Os raios horizontais dos bulbos alcançaram 0,24 e 0,28 m, para o ensaio com sobreposição e, 0,33 e 0,37 m para o sem sobreposição, respectivamente, após a infiltração da 3^a e 5^a aplicação da água (Figura 6). Os resultados concordam com Bresler (1978) e Ould Mohamed El-Hafedh et al. (2001), que descrevem um incremento no raio horizontal do bulbo molhado, em ensaios de campo, com o aumento do volume de água.

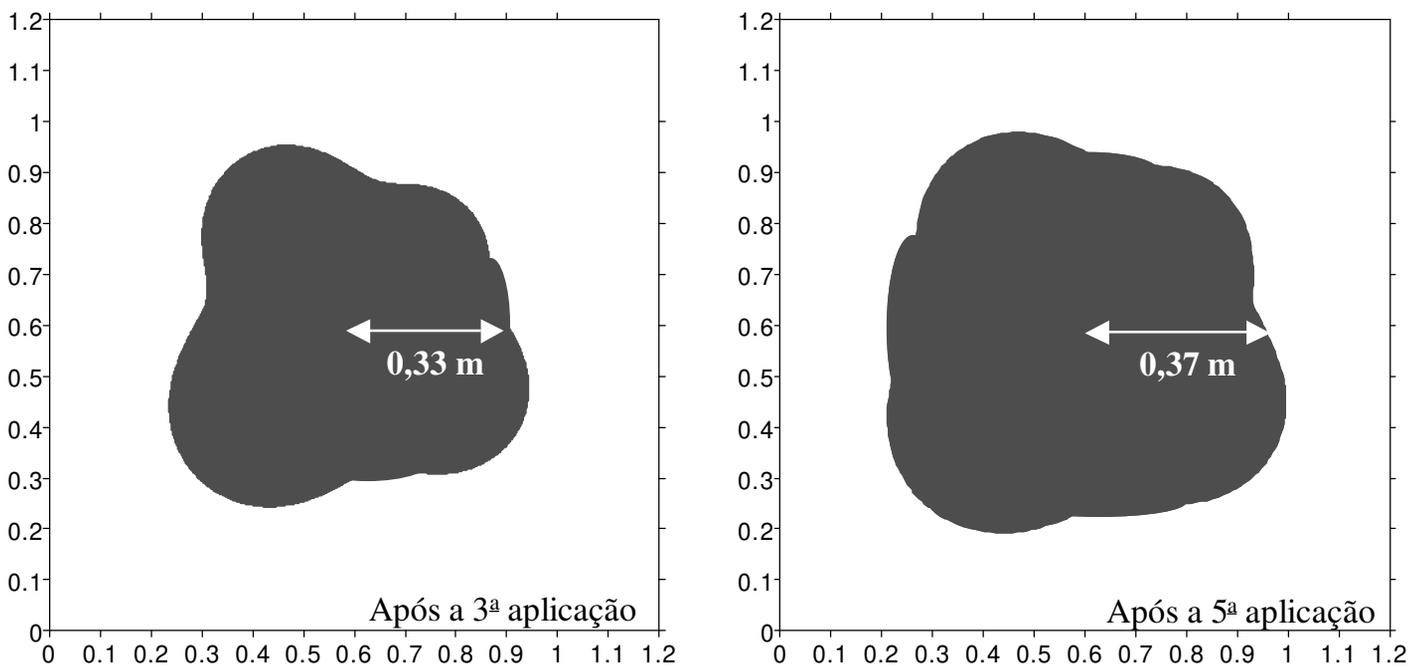
Outro efeito relacionado com expansão da área superficial molhada foi observado diferentemente para os respectivos ensaios, com e sem sobreposição. As áreas molhadas na superfície do solo foram de 0,38 e 0,57 m² para o ensaio com bulbos sobrepostos e 0,37 e 0,53 m² para o ensaio sem sobreposição, respectivamente após a 3^a e 5^a aplicação. De acordo com estes resultados, o ensaio com sobreposição obteve uma maior área superficial molhada

devido ao fato de usar duas fontes para a infiltração da água no solo. Isto demonstra e comprova que o aumento da área de infiltração promove significativas mudanças na formação do bulbo molhado.

Com sobreposição



Sem sobreposição



* Distância em metros

Figura 6. Área superficial molhada dos bulbos observados para os ensaios com e sem sobreposição, após a 3ª e 5ª aplicação da água

A percentagem de área molhada depende de fatores relacionados ao espaçamento, vazão dos gotejadores e propriedades físicas do solo. Porém, a área mínima ideal para o dimensionamento do sistema não está ainda definida, sendo razoável, segundo Keller & Bliesner (1990) considerar uma percentagem inferior a 67 % para regiões áridas e superior a 33 % para regiões de irrigação suplementar. Nesse caso, as percentagens observadas concordam com o recomendado. Entretanto, a área molhada sobreposta não ultrapassou 10 %; os mesmos autores citados anteriormente sugerem sobrepor em 20 % para alcançar índices ideais de uniformidade de distribuição da água no solo. Paralelamente, dentro deste contexto surge a importância de poder alterar a área superficial molhada com a combinação de espaçamentos entre gotejadores. A menor área molhada reduz a perda de água por evaporação, obrigatoriamente, o fator econômico se impõe em contrapartida aos seus investimentos no projeto com o aumento de gotejadores. Sendo assim, essas evidências despertam a necessidade de estudar diferentes combinações de espaçamentos entre gotejadores.

A Figura 7 apresenta uma avaliação da umidade média dentro do volume de controle ajudando a entender alguns problemas causados pela uniformidade de distribuição da água no solo. A avaliação verificou que a capacidade de campo foi atingida, na camada de 0,0-0,20 m, após a 3ª aplicação da água para o ensaio sem sobreposição de bulbos. Mas a umidade média, para o ensaio com sobreposição, estabilizou-se próxima à capacidade de campo após a 4ª aplicação. Na camada de 0,20-0,40 m, a umidade média do ensaio com sobreposição foi calculada em $0,29 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, sendo que o ensaio sem sobreposição alcançou $0,31 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Ambos, os ensaios não atingiram a capacidade de campo, $0,39 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Este resultado demonstra que a distribuição da água no solo foi dependente da forma de aplicação, sendo observado valores de umidade pontuais de até $0,44 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para o ensaio que se usou apenas um gotejador para aplicar o volume desejado (Figura 8).

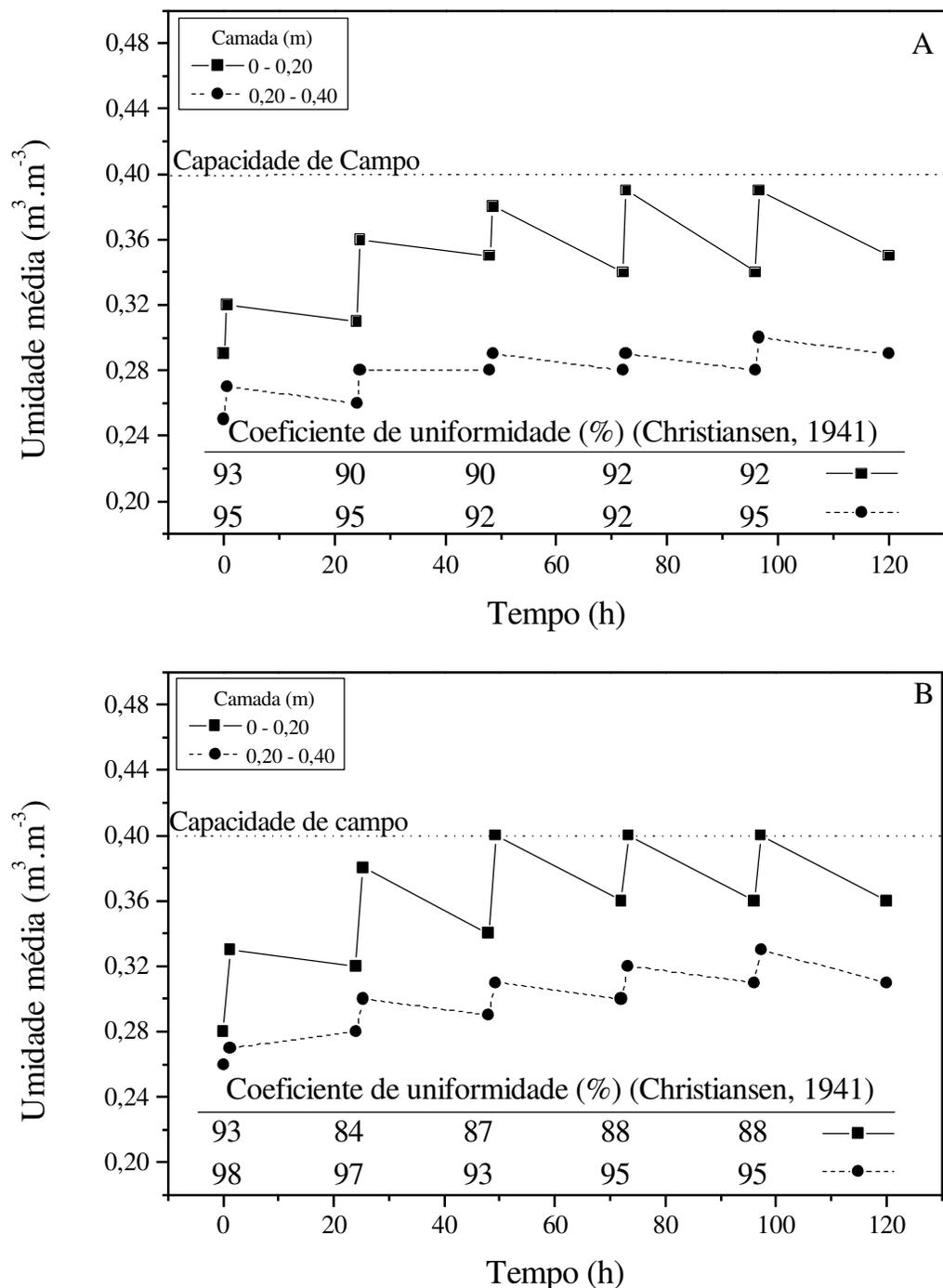


Figura 7. Umidade média, antes e após a aplicação da água, dentro do volume de controle; e o coeficiente de uniformidade de distribuição da água aplicada. A - com sobreposição e B - sem sobreposição

Uma análise de uniformidade comparativa foi aplicada entre os ensaios com o propósito de entender as diferenças entre os valores de umidade individuais estimados dentro do volume de controle (Figura 7). Desta forma, os coeficientes de uniformidade de Christiansen foram calculados para as umidades estimadas após cada aplicação de água seguindo a metodologia descrita por Ould Mohamed El-Hafedh et al. (2001).

Os maiores coeficientes de uniformidade, na camada 0,0-0,20 m, foram observados para o ensaio realizado com sobreposição, e na camada 0,20-0,40 m verificou-se os melhores resultados para o ensaio sem sobreposição. Sendo assim, pôde-se concluir que o efeito da sobreposição tem importância na melhoria da uniformidade da distribuição da água no solo, isto porque, obteve-se maior sobreposição entre os bulbos na camada de 0,0-0,20 m, corrigindo a uniformidade de distribuição com a redução do gradiente de umidade (Figura 8).

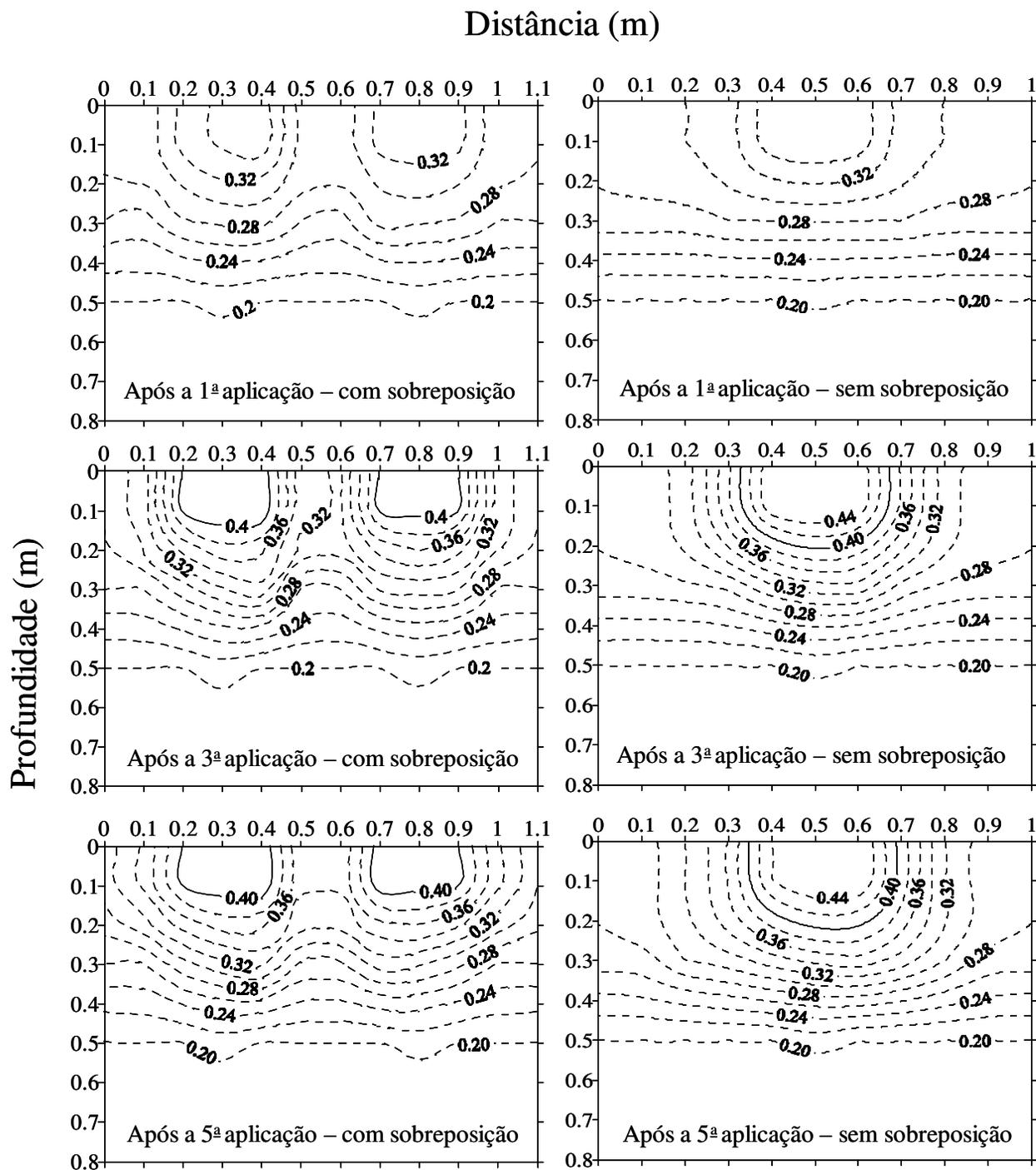


Figura 8. Comparação entre as distribuições de água no solo para os ensaios com e sem sobreposição de bulbos

Mesmo com menor sobreposição na camada 0,20-0,40 m e, conseqüentemente menor coeficiente de uniformidade, a pequena sobreposição ocorrida promoveu um significativo movimento da água para a camada de 0,40-0,60 m, revelando, mais uma vez, a sensibilidade da dinâmica da água perante pequenas variações do potencial total e da condutividade hidráulica.

CONCLUSÕES

O sistema de irrigação por gotejamento é considerado como uma das técnicas mais eficiente na aplicação da água no solo. Todavia, o uso inadequado desta técnica e o desconhecimento de sua relação com as propriedades físicas do solo garantem um certo empirismo no dimensionamento do sistema. Assim sendo, determinar elementos básicos para auxiliar na utilização adequada da técnica foi o objetivo desse trabalho, do qual os resultados apresentados possibilitaram concluir que:

1. Para as condições de estudo foi necessária a realização de 2 ou 3 irrigações sucessivas para o dimensionamento do bulbo molhado.
2. A umidade inicial do solo, o volume aplicado, a vazão do gotejador, o disco saturado e, principalmente, a condutividade hidráulica são elementos importantes e, devem ser conhecidos para o dimensionamento e o manejo adequado da irrigação.
3. Para as condições de estudos, ao se dobrar a vazão do gotejador diminuir-se o movimento vertical da água e aumentou-se o movimento horizontal, de forma favorecer a redução da percolação da água.
4. O volume aplicado por dois gotejadores, sobrepondo os bulbos molhados, aumentou a uniformidade de distribuição da água no solo, porém esta operação reduziu a umidade média dentro do volume de solo molhado. Evidenciando-se, assim, a necessidade de estudar combinações de espaçamentos entre gotejadores.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores: Dr. Roberto Testezlaf, Dr. Dani Or, e Alberto Colombo pelo apoio técnico.

LITERATURA CITADA

Assaf, R.; Levin, I.; Bravdo, B.A. Optimization of water for fruit trees by a computerized irrigation system. *Agronomy Journal*, Madison, v.9, p.451-456, 1989.

- Azevedo, H.M. Irrigação localizada. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.12, p.40-53, 1986.
- Ben-Asher, J.; Lomen, D.O.; Warrick, A.W. Linear and non-linear models of infiltration from a point source. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.42, p.3-6, 1978.
- Brandt, A.; Bresler, E.; Diner, N.; Ben-Asher, J.; Heller, J.; Goldberg, D. Infiltration from a trickle source. I Mathematical models. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v.35, p.675-683, 1971.
- Bresler, E.; Heller, J.; Diner, N.; Ben-Asher, J.; Brandt, A.; Goldberg, D. Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v.35, p.683-689, 1971.
- Bresler, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. Irrigation Science, New York, v.1, p.3-17, 1978.
- Bouwer, H. Integrated water management: emerging issues and challenges. Agricultural Water Management, Amsterdam, v.45, p.217-228, 2000.
- Clothier, B.E.; Scotter, D.R. Constant-flux infiltration from a hemispherical cavity. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.46, p.696-700, 1982.
- Clothier, B.E. Solute travel times during trickle irrigation. Water Resources Research, Washington, v.20, p.1848-1852, 1984.
- Clothier, B.E.; Scotter, D.R.; Harper, E.R. Three-dimensional infiltration and trickle irrigation. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.28, p.497-501, 1985.
- Christiansen, J.E. The uniformity of application of water by sprinkler systems. Agricultural Engineering, St. Joseph, v.22, p.89-92, 1941.
- Dasberg, S.; Bresler, E. Drip irrigation manual. Bet Dagan, Israel: IIC Publications 9, 1985.
- Dasberg, S.; Or, D. Drip Irrigation. Berlin: Springer, 1999, 162p.
- Keller, J.; Bliesner, R. Sprinkle and trickle irrigation. New York: Chapman and Hall, 1990, 652p.
- Nogueira, C.C.P.; Leão, M.C.S.; Coelho, E.F. Volume de solo molhado por emissor posicionado na superfície e abaixo da superfície do solo. In: Congresso Agrícola Internacional de Ingeniería, 3, 1999, Chillán. Anais... Chillán: Universidad de Concepción, 1999.

- Or, D. Stochastic analysis of water monitoring for drip irrigation management in heterogeneous soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.59, p.1222-1233, 1995.
- Or, D. Drip irrigation in heterogeneous soils: study-state field experiments for stochastic model evolution. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.60, p.1339-1349, 1996.
- Ould Mohamed El-Hafedh, A.V.; Daghari, H.; Maalej, M. Analysis of several discharge rate-spacing-duration combinations in drip irrigation system. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.52, p.33-52, 2001.
- Philip, J.R. General theorem on steady infiltration from surface sources, with application to point and line sources. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.35, p.867-871, 1971.
- Randall, H.C.; Salvatore, J.L. Root growth and water status of trickle-irrigated cucumber and tomato. *Journal of the American Society Horticultural Science*, Mount Vermon, v.113, p.830-835, 1988.
- Raats, P.A.C. Stasy infiltration from point sources, cavities, and basins. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.35, p.689-695, 1971.
- Revol, P.; Vauclin, M.; Vachaud, G.; Clothier, B.E. Infiltration from a surface point source and drip irrigation. 1. The midpoint soil water pressure. *Water Resources Research*, Washington, v.33, p.1891-1867, 1997.
- Schwartzman, M.; Zur, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.112, p.242-253, 1986.
- Shrivastava, P.K.; Parikh, M.M; Sawani, N.G.; Raman, S. Effect of drip irrigation and mulching on tomato yield. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.25, p.179-184, 1994.
- Solomon, K.; Keller, J. Trickle irrigation uniformity and efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.104, p.293-306, 1978.
- Souza, C.F.; Matsura, E.E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, p.63-68, 2002.

- Topp, G.C.; Davis, J.L.; Annan, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, Washington, v.16, p.574-582, 1980.
- Van Genuchten M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.44, p.892-98, 1980.
- WinTDR99. <http://psb.usu.edu/wintdr99/index.html>, 1999.
- Wooding, R.A. Steady infiltration from a circular pond. *Water Resources Research*, Washington, v.4, p.1259-1273, 1968.
- Wu, I.P.; Gitlin, H.M. Irrigations efficiencies of surface, sprinkler and drip irrigation. Wu, I.P.; Gitlin, H.M. Irrigations efficiencies of surface, sprinkler and drip irrigation. In: *World Congress on Water Resource Water for human needs*, 2, 1975, New Delhi-India. Proceedings... New Delhi: CBIP, 1975.

Publicação VI

**Avaliação de modelos de infiltração da água no solo para o dimensionamento da
irrigação por gotejamento**

(IV Congresso Internacional de Ingeniería Agrícola. 9-10 e 11 de maio de 2001. Chillán, Chile)

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO PARA O DIMENSIONAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO¹

Claudinei Fonseca Souza²; Edson Eiji Matsura²; Dani Or³; Alberto Colombo⁴ &
Roberto Testezlaf²

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Trabalho financiado pela Fapesp - 98/04931-7 e 13819-6

²Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil. Email: cfsouza@agr.unicamp.br

³Department of Plants, Soils, and Biometeorology, USU, Logan, Utah, USA

⁴Departamento de Engenharia, UFLA, Lavras, Minas Gerais, Brasil

INTRODUÇÃO

A demanda crescente por recursos de água acentua a necessidade de seu manejo cada vez mais racional, de modo a assegurar o equilíbrio do meio ambiente. Nesta mesma linha visando a racionalização do manejo, a irrigação por gotejamento vem se destacando proporcionando melhoria na qualidade de colheita, aumento de rendimento e eficiência no uso da água.

A irrigação por gotejamento é caracterizada pela aplicação de pequenas quantidades de água em alta frequência e diretamente na zona radicular. Isto permite manter a umidade próxima ao limite superior de disponibilidade de água em um determinado volume do solo (Dasberg & Bresler, 1985). Este volume é citado na literatura como bulbo molhado. Em alguns dimensionamentos pode-se necessitar mais de um bulbo por planta para que não haja confinamento de raízes em pequeno volume de solo tornando a cultura frágil. Os bulbos molhados são ainda importantes, pois, neles se concentrarão os produtos aplicados via água de irrigação, tais como fertilizantes, fungicidas, nematicidas, etc.

A estimativa adequada da forma e dimensões do volume molhado é de fundamental importância para a determinação do número de emissores por planta e da sua localização em relação à planta ou fileira de plantas. A subestimativa da porcentagem de solo molhado reduz a eficiência do sistema onerando-o desde o superdimensionamento da estrutura hidráulica até o desperdício de água, energia e fertilizantes; enquanto que a superestimativa poderá acarretar riscos de estresse à cultura, problemas de salinidade e promover a má distribuição do sistema radicular.

Uma das necessidades básicas para melhorar os conhecimentos sobre irrigação por gotejamento é obter maiores informações sobre os modelos matemático de movimento da água a partir de uma fonte pontual para diferentes tipos de solos e diferentes vazões do emissor. Os modelos para estimar o fluxo de água no solo, a partir de uma fonte pontual, têm recebido considerável atenção nos últimos anos. A muito tempo tenta-se simular os padrões de distribuição da água no solo através de modelos matemáticos. São muitos os modelos existentes para esse fim, entretanto, muitos deles ainda não foram validados para diversas condições.

O objetivo foi avaliar o uso de 3 modelos descritos na literatura no dimensionamento do volume molhado por gotejadores dispostos na superfície do solo. Para alimentar os modelos, utilizamos os dados obtidos em laboratório após o processo de infiltração da água no solo (Latosolo roxo distrófico).

METODOLOGIA

Monitorou-se a formação do bulbo molhado à partir de um gotejador com vazão constante. Foram utilizados colunas grandes de PVC com dimensões de 0,9 m de comprimento e 0,6 m de diâmetro preenchidas com solo deformado (TFSA), com as características: porosidade total (%), densidade (kg/m^3), condutividade hidráulica saturada (m/h) e umidade inicial (m^3/m^3) iguais à 55, 1200, 0,036, e 0,10 respectivamente, e parâmetros de ajuste da curva de retenção: $\theta_s=0,55 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $\theta_r=0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $\alpha_{vg}=1,149 \text{ m}^{-1}$, $n_{vg}=1,679$ e $m_{vg}=0,404$. Neste recipiente foram colocadas 12 sondas de TDR multihaste segmentadas para medição da umidade do solo, utilizando-se o aparelho modelo 6050X1 Trase System com multiplexador.

As sondas foram distribuídas simetricamente em 4 direções com espaçamento de 0,08 m, à partir do emissor, colocado no centro da coluna. Assim, observou-se a evolução do bulbo molhado para vazões de 2 e 4 L/h aplicando-se uma lâmina de 5 mm e monitorando-se durante 48 h, em intervalos de aquisição da umidade a cada 2 h.

Os resultados medidos foram comparados com valores simulados por três modelos diferentes. Os modelos matemáticos avaliados foram Schwartzman & Zur (1986), Healy & Warrick (1988) e Hydrus-2D, sendo apresentados a seguir:

Schwartzman & Zur (1986), descrevem um modelo para a distribuição da água no solo baseado em uma simplificação para a estimativa da geometria e volume do bulbo molhado. Assim, estes autores desenvolveram um modelo semi-empírico para descrever a frente de molhamento a partir de um emissor superficial em irrigação localizada. Eles relataram variáveis-chaves para a distribuição da água no solo, sendo, vazão do emissor q (m^3/s), condutividade hidráulica saturada K_s (m/s), volume total aplicado V (m^3), profundidade vertical e diâmetro lateral do bulbo molhado, z e d (m). Baseando-se no resultados de Bresler et al. (1971) para aplicação pontual, eles estimaram as seguintes equações:

$$z = 2,54 * V^{0,63} * \left(\frac{K_s}{q}\right)^{0,45} \quad (1)$$

$$d = 1,82 * V^{0,22} * \left(\frac{K_s}{q}\right)^{-0,17} \quad (2)$$

Healy and Warrick (1988), utilizam uma solução numérica solucionando a equação de Richards para aplicação pontual na superfície do solo. Os autores apresentam a estimativa de um coeficiente empírico generalizado para resolver a equação, e conseqüentemente, estimar o volume molhado de solo. Neste trabalho a equação resultante e os coeficientes são aplicados para diversas condições de solos e vazões de emissor. A forma geral da equação é:

$$r_i^* = A_i * \tau^{1/2} + B_i * \tau + C_i * \tau^{3/2} \quad (3)$$

onde r_i^* é a distância adimensional do emissor ($r_i^* = \alpha_{vg} * r_i$), r_i é a distância física e α_{vg} é um fator do tamanho da escala associado a retenção da água do modelo de van Genuchten (1980), i é um índice da direção de r : vertical ($i=1$; $r=0$), diagonal ($i=2$; $r=z$), e longitudinal a superfície do solo ($i=3$; $z=0$), τ é o tempo adimensional ($\tau = [\alpha_{vg} * K_s * t] / (\theta_s - \theta_r)$), os coeficientes A_i, B_i , e C_i são dependentes do parâmetro n (parâmetro de retenção de van Genuchten), e vazão adimensional $q^* = (\alpha_{vg}^2 * q / K_s)$. Como já mencionado neste trabalho os autores apresentam uma tabela extensa de coeficiente que auxiliam na grande maioria das situações práticas (tipos de solos e vazão do emissor) e segundo os autores as equações podem ser usadas com a finalidade de dimensionamento quando as propriedades hidráulicas do solo são conhecidas.

A equação de fluxo da água de Richards é de difícil solução por causa de sua dependência não linear da condutividade hidráulica em função da umidade do solo. Mas a equação de Richards pode ser resolvida por métodos numéricos, assim como diferenças finitas (Brandt et al., 1971; Lafolie et al., 1989) ou elementos finitos (Taghavi et al., 1984).

Simunek et al. (1993) desenvolveram um modelo numérico geral capaz de resolver a equação de Richards para duas dimensões, conhecida como SWMS 2D, ou mais recentemente, como Hydrus-2D. Este modelo é baseado em elementos finitos incorporados a uma interface gráfica (propriedades do solo, condições atmosféricas, vazão do emissor, condições de contorno, etc.), e fornece a visualização dos resultados simulados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se na Figura 1, o perfil de distribuição da água no solo com base nos dados colhidos no final do processo de infiltração para as vazões de 2 e 4 L/h. Foi escolhido este momento para uma uniformização dos modelos utilizados. O modelo de Schwartzmar & Zur (1986) apresenta uma desvantagem, podendo apenas ser aplicado para o período de infiltração e os demais modelos podem ser aplicados para a o processo de infiltração e redistribuição. Hydrus-2D foi o que mais se aproximou dos dados medidos. Sendo que os dois outros modelos, principalmente o modelo de Schwartzman & Zur (1986), não apresentaram aproximação satisfatória dentro das condições de estudo. Entretanto, ambos oferecem razoáveis informações que poderiam orientar o projetista dentro de uma proposta de dimensionamento, uma vez conhecidas e respeitadas suas limitações.

Uma observação importante é que o único modelo que necessita das condições iniciais de solo é o Hydrus-2D, e acredita-se que isso seja a responsável pela melhoria do ajuste. As condições iniciais são primordiais para a determinação adequada do movimento da água, uma vez que a condutividade hidráulica é função umidade do solo.

Outro fato é que os modelos de Schwartzman & Zur (1986) e Healy & Warrick (1988) usam a condutividade hidráulica saturada como uma de suas variáveis. Desta forma, acredita-se que o aspecto negativo dos modelos seja o uso deste parâmetro representando todo o volume molhado, não considerando a variabilidade espacial do solo.

O modelo de Healy & Warrick (1988) encontrou uma solução que superestimou o movimento lateral da água no solo, mas foi satisfatório o movimento vertical. O resultado

mais discrepante foi encontrado para a vazão de 2 L/h, onde o modelo indica uma distância lateral do emissor de 0,19 m contra os 0,14 m, representando uma diferença de 36 %. Este modelo apresentou características de movimento esférico da água, o que não é observado nas condições do estudo, onde sempre foi encontrado um movimento vertical predominante para a vazão de 2 L/h e um movimento lateral atuante para 4 L/h. Isto quando comparado as duas vazões utilizadas dentro das mesmas condições de solo.

A observação de superestimativa de movimento lateral também é relatada por Angelakis et al. (1993), quando os autores compararam o modelo de Healy & Warrick (1988) com outros dois modelos.

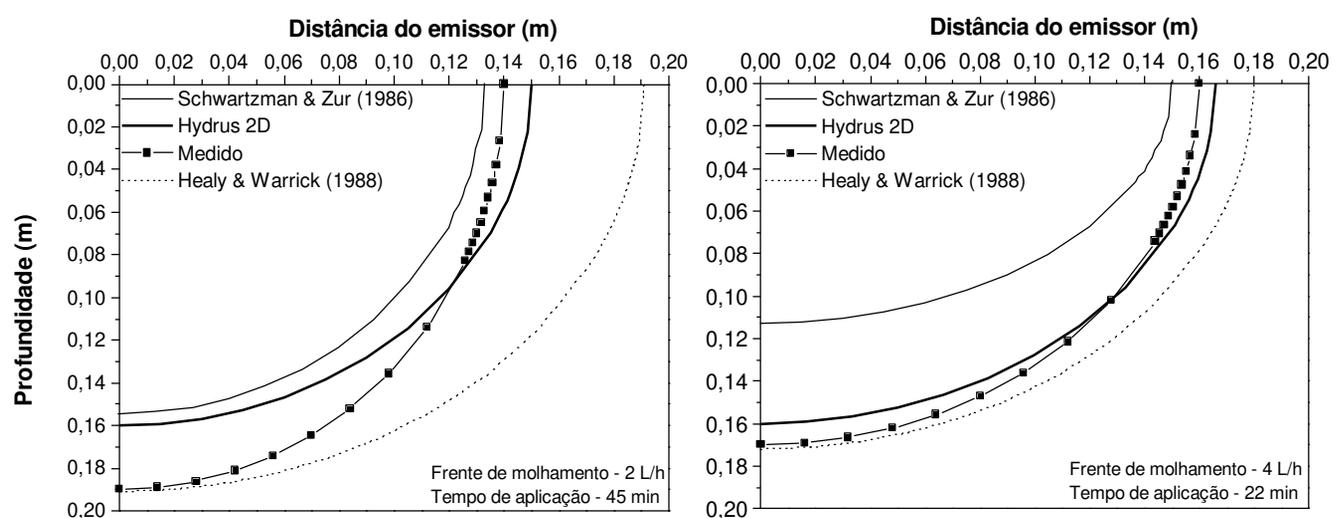


Figura 1. Frente de molhamento após o processo de infiltração

CONCLUSÃO

A utilização do modelo Hydrus-2D foi a mais satisfatória quando comparada com os demais modelos, mas observa-se que seu sucesso está amplamente condicionado às informações das condições de contorno experimental.

Sugere-se para estudos futuros o detalhamento da umidade dentro do bulbo molhado, principalmente ressaltando a estratificação da umidade em função das direções horizontal e vertical. Isso irá auxiliar a determinação do número de emissores e sua localização em relação à planta.

LITERATURA CITADA

- Angelakis, A.; Rolston, D.; Kadir, T.; Scott, V. Soil water distribution under trickle source. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.119, p.484-500, 1993.
- Brandt, A.; Bresler, E.; Diner, N.; Ben Asher, J.; Heller, J.; Goldberg, D. Infiltration from a trickle source. I Mathematical models. *Soil Science Soc. Am. Proc.*, Madison, v.35, p.675-83, 1971.
- Bresler, E., Heller, J., Diner, N. Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions. *Soil Science Soc. Am. Proc.*, Madison, v. 35, p.683-89, 1971.
- Dasberg, S.; Bresler, E. Drip irrigation manual. International Information Center (IIC) Bet Dagan, Israel. Publication 9, 1985.
- Healy, R.; Warrick, A. A generalized solution to infiltration from a surface point source. *Soil Science Soc. Am. J.*, Madison, v.52, p.1245-51, 1988.
- Lafolie, F. Guennelon, R. Van Genuchten, M. Analysis of water flow under trickle irrigation: I. Theory and numerical solution. *Soil Science Soc. Am. J.*, Madison, v.53, p.1310-1318, 1989.
- Simunek, J.; Vogel, T.; Van Genuchten, M. SWMS 2D: simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. US Salinity Lab, Riverside-CA, 1993.
- Schwartzman, M.; Zur, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.112, p.242-253, 1986.
- Taghavi, S. A.; Marino, M. A.; Rolston, D. E. Infiltration from trickle irrigation source. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.110, p.331-41, 1984.
- Van Genuchten M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Soc. Am. J.*, Madison, v.44, p.892-98, 1980.

DISCUSSÃO GERAL

As publicações científicas apresentadas possuem contribuições importantes no desenvolvimento do projeto de pesquisa que resultou no presente trabalho.

A Publicação I, “Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa de umidade do solo”, ampliou os conhecimentos mais básicos sobre o equipamento e forneceu um importante apoio às atividades do projeto. A Sonda de TDR multi-haste segmentada foi avaliada quanto às potencialidades e limitações na estimativa da distribuição espacial e temporal da água no solo, objetivo da primeira etapa do projeto. Nesse período, os esforços aplicados foram concentrados em torno dessa etapa, apontando melhorias na configuração original da sonda, otimizando-a e promovendo melhorias à metodologia a ser empregada. Isto porque, inicialmente, pensou-se em utilizar uma sonda de nêutrons para estimar a umidade do solo em profundidade superior a 0,60 m. A nova metodologia evitou o uso desta e, conseqüentemente, retirou a preocupação de possíveis interferências dos tubos de acesso na movimentação da água aplicada no solo.

No próximo passo, durante seis meses, sob a orientação do Dr. Dani Or, Programa de doutorado “Sanduíche” na USU – EUA financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Proc. n° 98/04931-7), diversas metodologias foram estudadas, conduzindo à Publicação II, “A variable-volume multi-wire TDR probe for measuring water content distribution”, deixaram o projeto mais adequado, principalmente com o uso de um novo equipamento de TDR, o Tektronix 1502 C. Assim, o progresso do projeto alcançou um bom domínio da técnica da TDR, o qual permitiu explorar melhor as vantagens da sonda de TDR multi-haste segmentada reduzindo as limitações com a perda do sinal eletromagnético ao longo da guia de onda e o tempo de aquisição da umidade do solo. Com esse conhecimento e as melhorias realizadas avançou-se para o estudo da formação do bulbo molhado, segunda etapa do projeto, avaliando-se os efeitos da relação água-solo que poderiam afetar o processo de infiltração e distribuição da água no solo.

O desenvolvimento da tecnologia de medição de TDR com as sondas multi-haste segmentadas pela presente pesquisa, produziu resultados que foram adotados com sucesso nos trabalhos de Coletti (2000), Rodrigues et al. (2001) e Coelho et al. (2001).

Na Publicação III, “Calibração do equipamento da TDR para um Latossolo vermelho distroférico”, desenvolveu-se uma equação de calibração para o solo em estudo, pois havia

incertezas na utilização da equação “universal” de Topp et al. (1980) para todos os tipos de solos. Desta maneira, o trabalho buscou formas para considerar o efeito da argila e do óxido de ferro nas estimativas de umidade do solo, obtendo-se uma equação padrão para o equipamento de TDR para as condições de estudo. A Publicação IV, “Multi-wire TDR probe with electrical impedance discontinuities for measuring water content distribution”, validou a equação de calibração desenvolvida e, ainda, possibilitou o amadurecimento da metodologia proposta, antecipando problemas que poderiam surgir em condições de campo. Assim, os resultados possibilitaram recomendar o uso de sondas de TDR Multi-haste segmentadas no estudo do movimento dinâmico da água em meio homogêneo e na determinação das dimensões do bulbo molhado.

Dando seqüência ao projeto, utilizou-se a técnica da TDR para entender a relação água-solo que poderiam afetar o processo de infiltração e distribuição da água no solo em função do tempo. Esse objetivo foi alcançado e confirmou que a condutividade hidráulica foi a propriedade física do solo mais importante entre as envolvidas no processo. Esta conclusão baseia-se no desfecho apresentado na Publicação V, “Infiltração e distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento”, na qual destaca-se a alteração das dimensões do bulbo molhado quando esta propriedade foi modificada pelas relações diretas com outras propriedades do solo, principalmente a umidade do solo. Além disso, a publicação demonstra que a formação do bulbo molhado não decorre apenas das relações água-solo, mas, também, da forma de aplicação da água entre as diferentes combinações de vazão e o número de gotejadores, participando da eficiência de distribuição da água para a planta. Porém, os resultados ainda não podem precisar critérios capazes de atuar no dimensionamento da irrigação por gotejamento. Apresentam, contudo, vários elementos básicos (a umidade inicial do solo, o volume aplicado, a vazão do gotejador e o disco saturado), se forem estudados, levarão à utilização adequada da técnica da irrigação.

A última etapa do objetivo era aplicar um modelo matemático para simular a distribuição espacial da água no solo. Inicialmente, o modelo matemático empírico descrito por Schwartzman & Zur (1986) foi aplicado para informações coletadas durante o ensaio de laboratório, o que demonstrou algumas tendências para a simulação e, também serviram de teste para outros dois modelos descritos na literatura: Healy & Warrick (1988) e Hydrus-2D (Simunek et al., 1993).

A Publicação VI (“Avaliação de modelos de infiltração da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento”) descreve que a utilização do programa Hydrus-2D foi a mais satisfatória quando comparada com os demais modelos, mas, observa-se que sua utilização está amplamente condicionada às informações prévias das condições de contorno experimental. Contudo, a metodologia descrita por Schwartzman & Zur (1986), para estimar as equações que simulam as dimensões do bulbo molhado, pode ser facilmente empregada para uma determinada condição de solo, auxiliando de forma simples no dimensionamento da irrigação por gotejamento. Uma vez que, para atingir as potencialidades do Hydrus-2D, são indispensáveis o conhecimento das relações entre as propriedades físicas do solo e um treinamento com o programa. Para esta última, o programa é pouco amigável com o usuário.

CONCLUSÃO GERAL

O estudo da infiltração e distribuição da água no solo em função do tempo pode determinar elementos básicos para auxiliar no dimensionamento adequado da irrigação por gotejamento. Porém, os testes de campo não são realizados devido às dificuldades envolvidas, principalmente por ser recomendado a abertura de trincheiras. Assim sendo, buscar alternativas, utilizando a técnica da TDR para o monitoramento da formação do bulbo molhado foi a hipótese deste trabalho. Desta forma, os resultados apresentados possibilitaram concluir que:

Quanto ao uso da sonda de TDR multi-haste segmentada.

1. As diferentes configurações das sondas utilizadas (segmentos de 0,10 e 0,20 m) mostraram-se aptas para a determinação da umidade do solo em processos dinâmicos da água em laboratório e campo; entretanto, verificou-se limitação do uso de sondas segmentadas, de 0,10 m.
2. Existe viabilidade no uso de sondas multi-haste segmentadas, na estimativa da distribuição espacial e temporal da água no solo.

Estudo da formação do bulbo molhado.

3. A metodologia proposta, em substituição ao método da trincheira, para a determinação do bulbo molhado utilizando sondas de multi-haste segmentadas se mostrou viável e confiável.
4. A umidade inicial do solo, o volume aplicado, a vazão do gotejador, o disco saturado e, principalmente, a condutividade hidráulica são elementos importantes e, devem ser conhecidos para o dimensionamento e o manejo adequado da irrigação.
5. Para as condições de estudos, ao se dobrar a vazão do gotejador diminuiu-se o movimento vertical da água e aumentou-se o movimento horizontal, de forma a favorecer a redução da percolação da água.
6. O volume aplicado por 2 gotejadores, sobrepondo os bulbos molhados, aumentou a uniformidade de distribuição da água no solo, porém esta operação reduziu a umidade média dentro do volume de solo molhado. Evidenciando-se assim a necessidade de estudar combinações de espaçamentos entre gotejadores.

Aplicação de um modelo matemático de simulação da distribuição espacial da água no solo.

7. A utilização do modelo Hydrus-2D foi a mais satisfatória quando comparada com os demais modelos, mas observa-se que sua utilização está amplamente condicionada às informações das condições de contorno experimental.
8. A metodologia descrita por Schwartzman & Zur (1986), para estimar as equações que simulam as dimensões do bulbo molhado, pode ser facilmente empregada para uma determinada condição de solo, auxiliando de forma simples no dimensionamento da irrigação por gotejamento.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AZEVEDO, H.M. Irrigação localizada. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, p.40-53, 1986.
- BAKER, J. M.; ALLMARAS, R. R. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time domain reflectometry. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.54, p.1-6, 1990.
- BEJAT, L.; PERFECT, E.; QUINSENBERRY, V.L.; COYNE, M.S.; HASZLER, G.R. Solute transport as related to soil structure in unsaturated intact soil blocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, p.818-826, 2000.
- BLACK, J.D.F.; WEST, D.W. Water uptake by an apple tree with various proportions of the root system supplied with water. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 2, 1974. San Diego, Califórnia-EUA. **Proceedings...** ASAE Publication, 1974. p.364-367.
- BRESLER, E.; HELLER, J.; DINER, N; BEN ASHER, J.; BRANDT, A.; GOLDBERG, D. Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.35, p.683-689, 1971.
- BRESLER, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problem. **Irrigation Science**, New York, v.1, p.3-17, 1978.
- CHRISTOFIDIS, D. Recursos hídricos e irrigação no Brasil. In: WORKSHOP DISPONIBILIDADE DE ÁGUA E IRRIGAÇÃO NO NORDESTE, 1999, Brasília. **Texto...** ISPN, 1999. 34p.
- CLOTHIER, B.E.; SCOTTER, D.R.; HARPER, E.R. Three-dimensional infiltration and trickle irrigation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.28, p.497-501, 1985.

- COELHO, E.F. OR, D.; ANDRADE, C.L.T. Avaliação de regime permanente em irrigação por gotejamento e posicionamento de sensores de umidade e de potencial matricial no bulbo molhado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, p.1327-1333, 1995.
- COELHO, E.F.; OR, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.39, p.2007-2016, 1996.
- COELHO, E.F.; OR, D. Applicability of analytical solutions for flow from point sources to drip irrigation management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, p.1331-1341, 1997.
- COELHO, E.F., ANDRADE, C.L.T., OR, D., LOPES, L.C., SOUZA, C.F. Desempenho de diferentes guias de ondas para uso com o analisador de umidade TRASE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, p.81-87, 2001.
- COLETTI, C. **Caracterização do manejo de irrigação de uma cultura citricola com a utilização da TDR**. Campinas: Feagri/UNICAMP, 2000. 100p. Dissertação de Mestrado
- CONCIANI, W.; HERRMANN, P.S.P.; MACHADO, S.L.; SOARES, M.M. O uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para determinação da umidade do solo in situ. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v.19, p.189-199, 1996.
- DASBERG, S.; BRESLER, E. **Drip irrigation manual**. Bet Dagan, Israel: IIRC Publications 9, 1985.
- DASBERG, S.; OR, D. **Drip Irrigation**. Berlin: Springer, 1999. 162p.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic detection of soil moisture. Progress Report, 1. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v.3, p.76-86, 1977.

- FELLNER-FELDEGG, H. The measurement of dielectrics in the time domain. **Journal of Physics Chemicals**, Columbus, v.73, p.616-623, 1969.
- FRITH, G. L. T.; NICHOLS, D. G. Effects of nitrogen fertilizer application to part of a rrot system In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 2, 1974. San Diego, Califórnia-EUA. **Proceedings...** ASAE Publication, 1974. p.212-214.
- HALEVY, I; BOAZ, M.; ZOHAR, Y; SHANI, M.; DAN, H. **Trickle irrigation**. Irrigation and Dranage paper n ° 14, FAO, Rome, p.75-119, 1973.
- HEALY, R.; WARRICK, A. A generalized solution to infiltration from a surface point source. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.52, p.1245-51, 1988.
- HERKELRATH, W. N.; HAMBURG, S. P.; MURPHY, F. Automatic, real time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. **Water Resources Research**, Washington, v.27, p.857-864, 1991.
- HERRMANN, P.S.P. **Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de microondas**. São Carlos: EEESC – USP, 1993, 124 p. Dissertação Mestrado.
- KARMELI, D.; KELLER, J. **Trickle irrigation design**. Glendora, California: Rain Bird Sprinkling Manufacturing Corporation, 1975. 132p.
- KELLER, J. **Sprinkler and trickle irrigation**. Logan: Utah State University, 1984. 281p.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Chapman and Hall, 1990, 652p.

- LUCARELLI, J.R.F. **Alterações em características de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de manejo**. Campinas: Feagri/UNICAMP, 1997. 86p. Dissertação de Mestrado
- MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. **Plant and Soil**, Amsterdam, v.222, p.163-190, 2000.
- NADLER, A.; GAMLIEL, A.; PERETZ, I. Practical aspects of salinity effect on TDR-measurement water content: a field study. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.1070-1076, 1999.
- NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.31, p.213-237, 2001.
- OLITTA, A.F.L. **Os métodos de irrigação**. São Paulo: Nobel, 1977. 267p.
- OR, D. Drip irrigation in heterogeneous soils: study-state field experiments for stochastic model evolution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, p.1339-1349, 1996.
- OULD MOHAMED EL-HAFEDH, A.V.; DAGHARI, H.; MAALEJ, M. Analysis of several discharge rate-spacing-duration combinations in drip irrigation system. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.52, p.33-52, 2001.
- PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): Goteo, Microaspersión, Exudación**. Madrid: Ediciones Mundi – Prensa, 1987. 461p.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188p.

- REVOL, P.; VAUCLIN, M.; VACHAUD, G.; CLOTHIER, B.E. Infiltration from a surface point source and drip irrigation. 1. The midpoint soil water pressure. **Water Resources Research**, Washington, v.33, p.1891-1867, 1997.
- RODRIGUES, T.R.I., BATISTA, H.S., CARVALHO, J.M., GONÇALVES, A.O., MATSURA, E.E. Uniformidade de distribuição de água em pivô central, com a utilização da técnica TDR na superfície e no interior do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, p.187-191, 2001.
- SALLES, E.S. **Efeito da vazão e do volume de água aplicados por um emissor puntual nas dimensões do bulbo molhado em um latossolo vermelho-escuro álico**. Viçosa: UFV, 1990, 66p. Dissertação de Mestrado
- SCALOPPI, E. J. Critérios básicos para seleção de sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, p.54-65, 1986.
- SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.112, p.242-253, 1986.
- SELKER, J.R.; GRAFF, L.; STEENHUIS, T. Noninvasive time domain reflectometry moisture measurement probe. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.57, p.934-936, 1993.
- SIMUNEK, J.; VOGEL, T.; VAN GENUCHTEN, M. **SWMS 2D: simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media**. Riverside, California: US Salinity Lab, 1993. p.151.
- SOLOMON, K.; KELLER, J. Trickle irrigation uniformity and efficiency. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.104, p.293-306, 1978.

- SOUZA, C.F., MATSURA, E.E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentada para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, p.63-68, 2002.
- TAGHAVI, S. A.; MARINO, M. A.; ROLSTON, D. E. Infiltration from trickle irrigation source. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.110, p.331-341, 1984.
- TOMMASELLI, J.T.G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time Domain Reflectometry)**. Piracicaba: ESALQ-USP, 1997, 167p. Tese de Doutorado
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v.16, p.574-582, 1980.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: Applications to wetting front and steep gradients. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, p.672-678, 1982.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): a field evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.49, p.19-24, 1985.
- VIEIRA, D.B. Irrigação Gota-a-Gota. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 1, 1975, Brasília. **Anais...** Brasília: ABID, 1975. p.18-30.
- VIEIRA, D.B. Perspectiva do sistema de irrigação por gotejamento em São Paulo. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 1, 1975, Brasília. **Anais...** Brasília: ABID, 1975. p.31-33.

- WARD, A.L.; KACHANOSKI, R.G. ELRICK, D.E. Analysis of water and solute transport away from a point source. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, p.699-706, 1995.
- WARRICK, A.W. Time dependent linearized infiltration I Point sources. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison. v.38, p.383-386, 1974.
- WILLOUGHBY, P.; COCKROFT, B. Changes in foot pattern of peach trees under trickle irrigation. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 2, 1974. San Diego, California-EUA. **Proceedings...** ASAE Publication, 1974. p.439-442.
- WOODING, R.A. Steady infiltration from a circular pond. **Water Resources Research**, Washington, v.4, p.1259-1273, 1968.
- WU, I.P.; GITLIN, H.M. Irrigations efficiencies of surface, sprinkler and drip irrigation. In: World Congress on Water Resource - Water for human needs, 2, 1975, New Delhi-India. **Proceedings...** New Delhi: New Delhi: CBIP, 1975. p.191-199.
- ZEGELIN, S. J.; WHITE, I.; JENKINS, D. R. Improved fields probes for soil water content and electrical conductivity measurements using TDR. **Water Resources Research**, Washington, v.25, p.2367-2376, 1989.
- ZUR, B. Emitter discharge sensitivity to pressure and temperature. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.107, p.1-9, 1996.